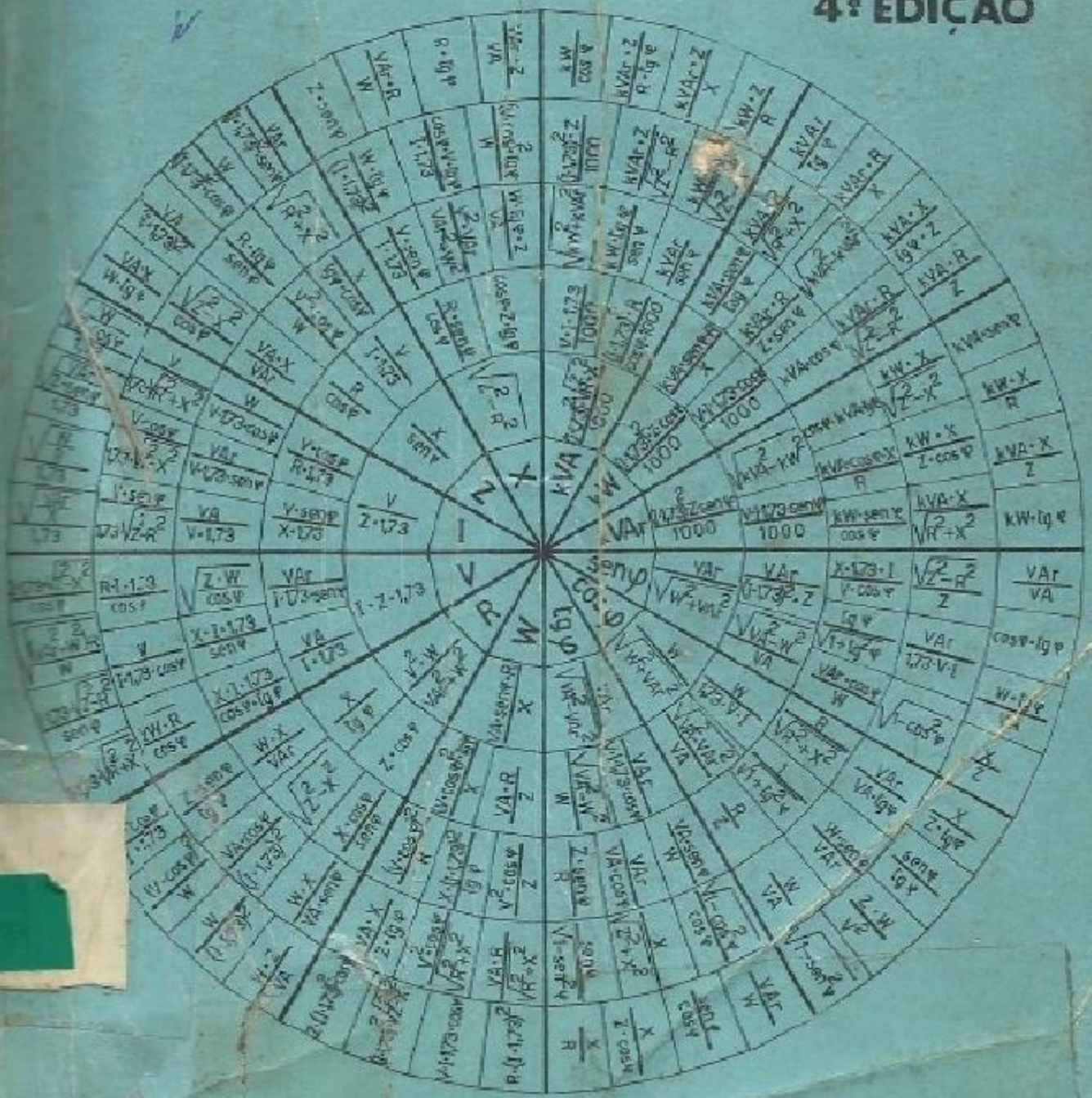
NARDO TOLEDO MUÑOZ

CÁLCULO DE ENROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS E SISTEMAS DE ALARME

4ª EDIÇÃO



BIBLIOTECA TÉCNICA FREITAS BASTOS

OUTROS LIVROS DA BIBLIOTECA TÉCNICA FREITAS BASTOS

FUNDAMENTOS DE ELETROTÉCNICA PARA TÉCNICOS EM ELETRÔNICA
P. J. Mendes Cavalcanti

Toda a teoria básica (circuitos de C.C., eletrostática, eletromagnetismo, circuitos de C.A. e noções de máquinas: transformadores, geradores e motores) indispensável à formação de técnicos em eletrônica ou de qualquer outro ramo em que a eletricidade seja uma das disciplinas. 72 problemas totalmente resolvidos e 199 propostos, com as respectivas respostas, contribuem para a mais fácil fixação dos conhecimentos adquiridos e proporcionam aos mestres excelentes oportunidades para novas considerações de ordem prática ou teórica.

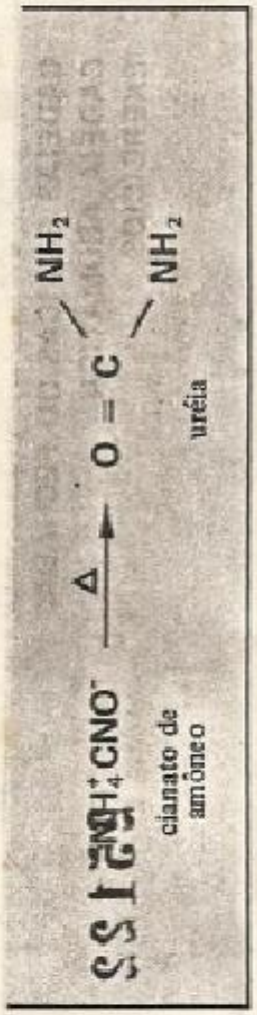
CURSO BÁSICO DE ELETRÔNICA
Allan Póvoas Ferreira

Um livro moderno para o ensino da eletrônica do estado sólido. Apresenta inicialmente os princípios básicos dos componentes semicondutores e, em seguida, os circuitos eletrônicos básicos em que os mesmos são aplicados. Todo um capítulo da obra é dedicado a um grande número de projetos de fontes de alimentação e amplificadores, todos previamente montados e testados pelo autor e usando componentes facilmente encontrados no mercado. Um questionário referente aos diversos capítulos, sugestões para novos projetos e a inclusão de um excelente apêndice com informações sobre semicondutores, transformadores, capacitores, etc., são outras características de destaque deste livro.

ou π (pi). Os orbit
ções no átomo.

Vamos estud
que nele aparece

1) somen



A partir dessa reação histórica iniciou-se uma verdadeira corrida às sínteses

CÁLCULO DE ENROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS E SISTEMAS DE ALARME

NARDO TOLEDO MUÑOZ

Cálculo de Enrolamentos de Máquinas Elétricas e Sistemas de Alarme

4.ª Edição

LIVRARIA FREITAS BASTOS S.A.

Rua 7 de Setembro, 127/129 - 20.050 - Rio de Janeiro - RJ
Rua Maria Freitas, 110-A - 21.351 - Rio de Janeiro - RJ
Rua 15 de Novembro, 62/66 - 01013 - São Paulo - SP
Rua Domingos de Morais, 2.414 - 04036 - Vila Mariana - SP
Rua Luís Góes, 2.111 - 04043 - Ibirapuera - SP

CÁLCULO DE ENROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS E SISTEMAS DE ALARME

Nardo Toledo Muñoz

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS — Nos termos da lei que resguarda os direitos autorais, é proibida a reprodução, total ou parcial, bem como a produção de apostilas a partir deste livro, de qualquer forma ou por qualquer meio — eletrônico ou mecânico, inclusive através de processos xerográficos, de fotocópia e de gravação — sem permissão, por escrito, do Editor e do Autor.

4ª EDIÇÃO — 1987

Impresso no Brasil
Printed in Brazil

Nº 3934

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
E CULTURA
ESCOLA TÉCNICA FEDERAL
DE PERNAMBUCO
BIBLIOTECA
12004

FICHA CATALOGRÁFICA
(reprodução reduzida da ficha de 75x125mm)

Toledo Muñoz, Nardo.

Cálculo de enrolamentos de máquinas elétricas e sistemas de alarme. 4.ª ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1987.

287 p. ilust. (Bibl. Técnica Freitas Bastos)

1. Máquinas elétricas. 2. Sistema de alarme. 3. Motores elétricos. I. Série. II. Título.

CDD 621.31

ÍNDICE

PRIMEIRA PARTE

Capitulo 1 — **APLICAÇÃO DA CORRENTE CONTÍNUA** ..... Pág. 11
Aplicação da corrente continua. — Caracteristicas do motor de C.C. — Principio de funcionamento do motor de C.C. — Momento de rotação desenvolvido por um motor de C.C.

Capitulo 2 — ENROLAMENTO DO INDUZIDO ..... Pág. 17
Introdução. — Tipos de induzido. — Induzido em anel de Gramme. Induzido tipo tambor. — Forma de representar as bobinas. — Simbolos convencionais para o sentido da corrente nos condutores. Tipos de enrolamento do induzido.

Capitulo 3 — BOBINAMENTO IMBRICADO ..... Pág. 23
Enrolamento em paralelo. — Passos do enrolamento. — Passo polar. — Cálculo dos passos do enrolamento imbricado. — Posições relativas que ocupam nas ranhuras os dois lados de uma bobina qualquer. — Tabela de bobinamento. — Determinação do passo da bobina. — Passo do comutador de enrolamentos imbricados. — Número de lâminas do comutador de enrolamentos imbricados. — Enrolamentos imbricados múltiplos. — Conexões equipotenciais. — Recapitulação sobre bobinamentos imbricados.

Capitulo 4 — BOBINAMENTO ONDULADO ..... Pág. 33.
Enrolamento em série. — Passo médio. — Passo do comutador de enrolamentos ondulados. — Enrolamento progressivo e regressivo. Número de lâminas do comutador dos enrolamentos ondulados. — Recapitulação sobre enrolamentos ondulados. — Enrolamento série-paralelo. — Bobinas múltiplas.

Capitulo 5 — COMUTAÇÃO ..... Pág. 41
Ação do comutador em um enrolamento de C.C. — Reação do induzido. — Conseqüências dos desvios do plano neutro. — Neutralização do plano neutro. — Pólos de comutação, interpolos ou pólos auxiliares. — Vantagem dos pólos de comutação. — Excitação dos motores de C.C.

Capítulo 6. TIPOS DE MOTORES ..... Pág. 45
Motor paralelo. — Motor série. — Motor composto. — Controle de velocidade dos motores de C.C. — Inversão do sentido de rotação do motor de C.C.

INICIO DOS XEROX XEROX Pag 49

SEGUNDA PARTE

Capítulo 7. BOBINAMENTO DE MOTORES PARA C.A. ..... Pág. 49
Divisão dos motores de C.A. — Motor síncrono. — Partida do motor síncrono. — Vantagens do motor síncrono. — Aplicações mais comuns do motor síncrono. — Motor assíncrono ou de indução. — Vantagens do motor assíncrono. — Desvantagens do motor assíncrono. — Aplicações do motor assíncrono. — Princípio de funcionamento do motor assíncrono. — Construção gráfica dos campos rotativos trifásicos. — Método para inverter o sentido de rotação do campo girante.

Capítulo 8. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DOS MOTORES DE C.A. ..... Pág. 57
Velocidade síncrona. — Escorregamento. — Deslizamento em percentagem. — Freqüência do rotor. — Escala de graduação da potência dos motores de C.A. — Construção mecânica de um motor de indução. — Características nominais do motor elétrico.

Capítulo 9. MÉTODOS DE ENROLAMENTO ..... Pág. 69
Bobinamento do estator. — Disposição das ranhuras. — Tipos de enrolamentos. — Enrolamento em espiral. — Bobinamento imbricado. — Bobinamento imbricado de passo integral. — Enrolamento imbricado de passo fracionário. — Vantagens do passo curto. — Desvantagens do passo curto. — Disposição das bobinas. — Enrolamentos de uma camada. — Bobinamentos de duas camadas.

Capítulo 10. CARACTERÍSTICAS DOS ENROLAMENTOS ... Pág. 83
Introdução. — Constituição dos pólos. — Bobinamentos por pólos. — Enrolamentos pelo método do pólo conseqüente. — Número de pólos. — Número de ranhuras por pólo e por fase. — Número de ranhuras do estator. — Bobinas. — Número total de bobinas. — Passo da bobina. — Passo polar. — Passo do enrolamento. — Normas para indicação do passo. — Graus elétricos. — Passo das ranhuras. — Passo das fases. — Grupos polares. — Bobinas por grupo. — Bobinas por fase. — Escolha dos terminais. — Distribuição das bobinas no rotor. — Enrolamentos fracionários. — Enrolamentos balanceados. — Exercício 1. — Número de bobinas por grupo de um enrolamento fracionário. — Exercício 2.

Capítulo 11. PRINCÍPIOS GERAIS DOS ENROLAMENTOS DE C.A. ..... Pág. 103
Condições dos bobinamentos. — Representação dos esquemas de enrolamentos. — Traçado do esquema de um enrolamento. — Exercício 3. — Enrolamento de rotores. — Rotor em curto-circuito. — Rotor bobinado.

Capítulo 12. MODIFICAÇÕES DOS MOTORES DE C.A. ..... Pág. 115
Principais modificações. — Problemas de enrolamentos. — Exercício 4. — Cálculo do fluxo magnético. — Cálculo do número de espiras. — Cálculo da seção do condutor. — Cálculo do conjugado básico. — Rendimento. — Modificação dos motores para nova tensão. — Exercício 5. — Exercício 6. — Modificação do número de pólos. — Alterações da velocidade. — Exercício 7. — Modificação da freqüência. — Mudança da freqüência. — Efeitos da variação da freqüência. — Variação tolerável da tensão e da freqüência. — Comportamento em 60 Hz dos motores de 50 Hz, tensão e potência constantes. — Comportamento em 50 Hz dos motores de 60 Hz, tensão e potência constantes. — Exercício 8 e 9. — Mudança de fase e de tensão. — Influência da mudança de fase nos rotores bobinados.

TERCEIRA PARTE

Capítulo 13. MOTORES PARA VÁRIAS TENSÕES ..... Pág. 151
Introdução. — Ligação série-paralelo. — Ligação de um motor em estrela para duas tensões. — Motor com ligação triângulo para duas tensões. — Enrolamentos de motores para quatro tensões. — Motores assíncronos de várias velocidades. — Motores de comutação de pólos. — Mudança do número de pólos. — Princípio das fases. — Agrupamentos das fases na conexão Dahlander. — Ligação estrela, dupla-estrela. — Conexão triângulo, estrela-paralelo.

Capítulo 14. MOTORES DE VELOCIDADES MÚLTIPLAS ..... Pág. 171
Introdução. — Motor de quatro velocidades. — Motores síncronos de duas velocidades. — Motores de corrente trifásica com comutador. — Motor assíncrono funcionando como gerador.

Capítulo 15. CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES ASSÍNCRONOS Pág. 179
Introdução. — Classe A. — Classe B. — Classe C. — Classe D. — Classe E. — Classe F. — Rotor bobinado. — Observação. — Aplicação dos diversos tipos de motores de indução. — Temperatura admissível dos motores elétricos. — Divisão dos motores em diversas classes de isolamento. — Condições usuais de serviço dos motores elétricos. — Funcionamento dos motores trifásicos com corrente monofásica. — Motores de indução bifásicos.

Capítulo 16. MOTORES MONOFÁSICOS ..... Pág. 185
Introdução. — Motor de fase auxiliar ou de fase dividida. — Enrolamentos monofásicos. — Disposição relativa dos enrolamentos. — Motor série. — Motor síncrono monofásico. — Arranque dos motores de indução monofásicos. — Partida do motor de indução monofásico com pólo auxiliar. — Motores de repulsão. — Interruptores automáticos para o enrolamento auxiliar. — Denominação dos terminais de um motor monofásico. — Motores monofásicos de várias velocidades. — Motores de alta rotação. — Conversor de freqüência de indução. — Emprego dos motores monofásicos. — Esquema do enrolamento de um motor monofásico.

Capítulo 17. CONTROLE DOS MOTORES ELÉTRICOS ..... Pág. 193
Funções principais do controle. — Partida. — Parada. — Sentido de rotação. — Regulação da velocidade. — Limitação da corrente de partida. — Proteção mecânica. — Motor à prova de pingos e respingos. — Motor totalmente fechado. — Motor a prova de explosão. — Proteção elétrica.

Capítulo 18. TERMINOLOGIA ..... Pág. 197
Alarme. — Botoneira. — Chave. — Chave de partida direta. — Chave demarradora. — Chave magnética ou contator. — Chave estrela-triângulo. — Chave compensadora. — Chave comutadora. — Chave reversora. — Chave fim de curso. — Chave de faca. — Chave de emergência. — Controlador. — Controle de seqüência. — Denominação dos terminais de um motor trifásico. — Disjuntor. — Fator de potência. — Freagem dinâmica. — Fusíveis. — Fusível rápido. — Fusível retardado. — Fusível de duplo efeito. — Interruptor. — Intertravamento. — Regulador. — Relé. — Relé de tempo. — Relé bimetálico. — Relé automático. — Relé térmico com retenção. — Reversão. — Servomecanismo. — Sistema. — Sobrecarga. — Sobrecorrente. — Temporizador.

Capítulo 19. REPRESENTAÇÃO DOS DIAGRAMAS ELÉTRICOS Pág. 203
Introdução. — Método para a representação dos esquemas. — Esquema de princípio. — Esquema de circulação de corrente. — Esquema unifilar. — Esquema de funcionamento.

QUARTA PARTE

Capítulo 20. CONTROLE AUTOMÁTICO PARA MOTORES ... Pág. 209
Introdução. — Comando a botão. — Ligação de motores de C.C. à rede de alimentação. — Controle de um motor de C.C. por meio de f.c.e.m. — Controle de aceleração de um motor de C.C. por queda de tensão. — Controle para a reversão de motores de C.C.

Capítulo 21 SISTEMA DE ARRANQUE DE MOTORES TRIFÁSICOS ..... Pág. 219
Introdução. — Efeitos causados pela partida de um motor com rotor em curto-circuito ligado diretamente à rede. — Partida de um motor de rotor bobinado. — Limitações da corrente de partida. — Partida de motores com chave magnética. — Arranque de motores com chave estrela-triângulo. — Tensão reduzida. — Corrente reduzida. — Chave estrela-triângulo automática. — Arranque de motores polifásicos com chave compensadora. — Redução da tensão e da corrente solicitada da linha. — Chave compensadora de partida manual. — Chave compensadora de partida automática. — Chaves reversoras. — Chaves para motores com variação de pólos. — Operação da chave para motores de duas velocidades. — Dispositivo de comutação polar para variar a velocidade. — Ligação de capacitores em mototores. — Descarga de capacitores. — Diagrama das ligações elétricas de um elevador.

Capítulo 22. PROTEÇÃO DE MOTORES DE C.A. ..... Pág. 247
Proteções. — Proteção contra curto-circuito. — Proteção contra sobrecargas. — Proteção contra superaquecimento do estator. — Proteção diferencial. — Proteção contra subtensão. — Proteção contra interrupção de uma fase. — Proteção contra reversão de fase. — Proteção contra inversão de energia. — Proteção contra subvelocidade. — Proteção contra perda de sincronismo. — Proteção contra sobreaquecimento dos mancais. — Proteção contra falhas para terra, — Proteção contra a umidade. — Método de operação e proteção de um motor de C.A.

Capítulo 23. PROTEÇÃO DE MOTORES DE C.C. ..... Pág. 265
Introdução. — Proteção contra curto-circuitos. — Proteção contra sobrecarga e sobrecorrente. — Proteção contra superaquecimento. — Proteção contra sobrevelocidade. — Proteção contra reversão de polaridade. — Proteção contra perda de excitação. — Proteção contra falhas para a terra. — Proteção contra sobreaquecimento dos mancais. — Descarga do campo magnético. — Proteção contra contato acidental.

QUINTA PARTE

Capítulo 24 SISTEMAS DE ALARME ..... Pág. 271
Introdução. — Tipos de alarme. — Dispositivos de sinalização. — Sistemas de alarmes duplos. — Sistemas de alarme em que cada ponto de sinalização exige apenas uma lâmpada. — Sistema de alarme em que cada ponto de sinalização requer duas lâmpadas. — Sistema de alarme com uma lâmpada de aviso e outra de reconhecimento. — Sinal de alarme temporizado. — Determinação gráfica do fator de potência e das potências ativa, reativa e aparente. — Fórmulas para determinação de grandezas de C.C. e C.A. Valores de referência das fórmulas.

Capítulo 1

APLICAÇÃO DA CORRENTE CONTÍNUA

A C.C. é utilizada em circuitos eletrônicos, instalações de eletroquímica, automóveis, astronáutica, transmissão de energia elétrica a grandes distâncias, etc. Os motores de corrente contínua assumiram nos últimos anos importância vital em vários campos especiais da técnica moderna.

Há muitos casos em que a C.C. é mais apropriada para determinados tipos de trabalho, onde os motores de C.C. com velocidade ajustável são superiores aos de corrente alternada (C.A.), como por exemplo no caso dos serviços de trens, ascensores, tipografias, **trolley bus**, bondes, indústria siderúrgica, fábrica de papel, indústria de tecidos, controle de computadores, etc., nos quais o controle exato e precisão de velocidade são exigências fundamentais.

CARACTERÍSTICAS DO MOTOR DE C.C.

O motor e o gerador de C.C. apresentam as mesmas características essenciais e são muito semelhantes em aparência externa. A diferença está apenas no sentido que se processa a transformação de energia e no uso a que se destinam. Em um gerador, a energia mecânica é usada para ser transformada em energia elétrica. Em um motor, a energia elétrica é usada para ser transformada em energia mecânica, empregada para a movimentação de um aparelho utilizador qualquer. A transformação realiza-se por meio do induzido provido de condutores na sua superfície, girando em um campo magnético fixo.

Um gerador pode funcionar como motor e esta propriedade é aproveitada em diversas aplicações práticas.

Tanto o gerador como o motor de corrente contínua possuem: Bobinas de campo (a expressão "campo magnético" encurta-se para "campo") fixas dentro de uma carcaça de aço; Induzido — o rotor com o enrolamento chama-se induzido e é provido de canais ou ranhuras longitudinais contendo as bobinas ligadas a um comutador; Comutador (sinônimo de coletor) é feito de lâminas de cobre isoladas entre si; Conjunto de escovas.

Bobina de campo

Bobinamento adequadamente isolado para ser montado sobre uma peça polar ou pólo de campo, destinada a produzir o campo magnético ou força magnetomotriz necessária para o funcionamento do motor.

Pólo de Campo ou Peça Polar

Cada uma das partes da estrutura magnética do motor que serve para o bobinamento de campo e onde se produz um campo concentrado ou força magnetomotriz.

Carcaça

A estrutura ou peça que suporta todas as outras peças do motor. Também faz parte do circuito magnético do motor, por isso é provida de pés de fixação.

Estator

Parte do motor que consiste dos elementos estacionários.

Rotor

Elemento girante do motor, também chamado armadura ou induzido.

Ranhuras

São reentrâncias cortadas longitudinalmente na periferia do induzido para alojamento dos enrolamentos.

Dente

Parte do ferro (núcleo) compreendida entre duas ranhuras consecutivas.

Comutador

Conjunto de segmentos condutores, isolados entre si e, também do eixo, destinados a comutar a corrente nos condutores a eles ligados.

Lâmina

Cada um dos segmentos condutores que compõem o comutador, onde são ligados os fios do enrolamento.

Escova

Peça condutora deslizante sobre o comutador, destinada a estabelecer contato entre a parte estacionária e girante do motor.

Porta-Escovas

Dispositivo destinado a manter uma ou mais escovas em posição centrada, guiadas e, devidamente pressionadas contra o comutador, por suportes.

Suporte de Porta-Escovas

É uma estrutura suporte isolada do motor destinada a manter os porta-escovas em suas posições relativas.

Dispositivo para regular a pressão da escova

A regulagem faz-se através de uma mola regulável que mantém uma pressão constante entre as escovas e o comutador. Tal regulação é necessária, varia com o tipo de material e com o grau de desgaste da escova. Uma pressão muito pequena ocasiona mau contato, faiscamento e queima do comutador. Uma pressão muito alta dá lugar a um desgaste excessivo e superaquecimento devido ao atrito.

Eixo

Peça que suporta todo o conjunto do induzido e gira apoiado nos mancais existentes nas tampas.

Tampa

Peça fixa à carcaça, destinada a suportar um mancal onde se apóia o eixo do rotor e, proteger as partes internas do motor.

Frente de um motor

Face ou extremidade oposta à ponta do eixo, destinada a receber o dispositivo de acoplamento.

Sentido de rotação

O sentido de rotação entende-se olhando da ponta do eixo para o motor. O motor gira normalmente para a direita (sentido dos ponteiros do relógio).

Caixa de ligações

É o painel de terminais do motor facilmente acessível para ligação rápida do motor à rede de alimentação, mudança imediata de tensão, mudança rápida do sentido de rotação, etc.

A caixa de ligações encontra-se, normalmente, à esquerda do motor, visto pelo lado da ponta do eixo.

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE C.C.

O tipo de motor básico de C.C. está representado na fig. 1. Consiste em um induzido formado de uma bobina, constituída por uma única espira de fio que gira entre os pólos de um indutor composto de um imã permanente (ou um eletroímã de C.C.). Cada ponta da bobina (espira) é ligada a uma lâmina de um comutador, que por sua vez faz contato com um conjunto de escovas. As escovas por meio de dois fio recebem energia de uma fonte de corrente contínua.

Quando se aplica uma C.C. às escovas e a corrente passa através da espira (bobina ou induzido), o campo magnético criado por ela age como um imã, realizando uma interação com o campo magnético existente entre os pólos do imã permanente e a espira, deslocando-se o induzido pela força resultante existente entre os dois campos magnéticos.

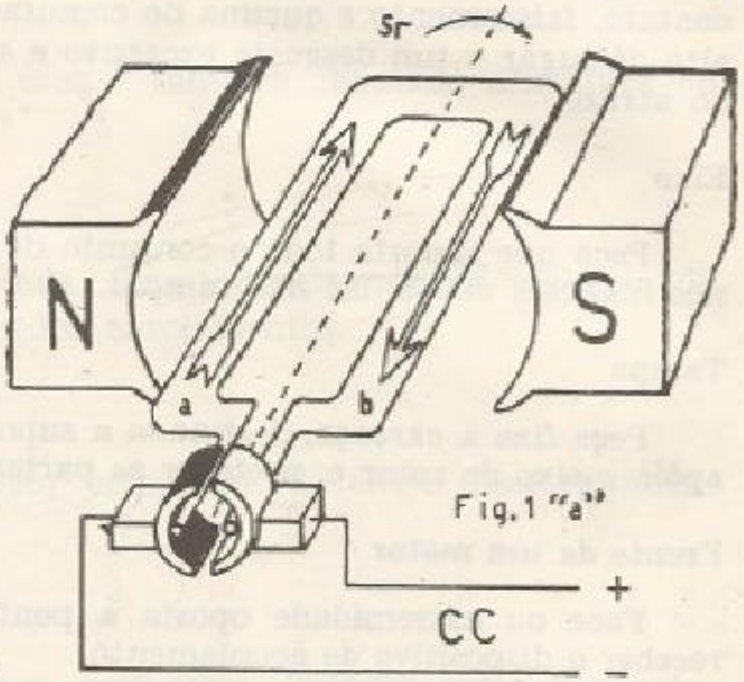


Fig. 1, «a» — Motor de C.C.
Sr. — sentido de rotação
ab — sentido das correntes.

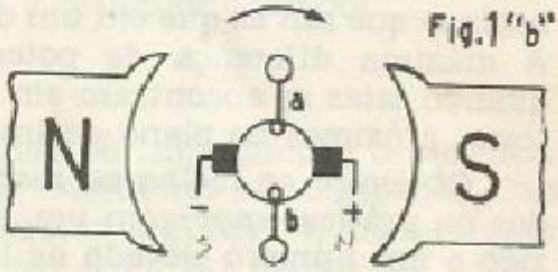
MOMENTO DE ROTAÇÃO DESENVOLVIDO POR UM MOTOR DE C.C.

A fim de se compreender como o induzido de um motor de C.C. gira continuamente, considere-se o motor elementar da fig. 1, que nos mostra uma bobina (induzido) retangular, de uma única volta de fio, cujo plano fica paralelo ao campo magnético. Existe uma relação definida entre o sentido do campo magnético produzido pelos pólos do imã permanente (ou pelas bobinas indutoras) o sentido da corrente no condutor, e aquela segundo a qual se desloca o condutor (bobina). Esta relação é dada pela conhecida

regra de Fleming, da mão direita, para motores. Observe-se na fig. 1 "a", o sentido das correntes, indicado pelas flechas colocadas ao longo dos condutores da espira. A corrente circula no lado esquerdo "a" da bobina afastando-se do observador como que penetrando no papel e, pela aplicação da regra da mão direita este condutor tende a se deslocar para cima. No lado direito ou "b" a corrente se aproxima para o observador como que saindo do papel e, pela aplicação da mesma regra, conclui-se que este condutor procura deslocar-se para baixo, com uma força igual ao condutor anterior.

Como a corrente tem a mesma intensidade nos dois condutores da espira (esta age como um imã) e ambos estão dentro de um campo magnético de igual intensidade. Os pólos formados na espira são atraídos para os pólos de nomes contrários do campo (imã permanente) desenvolvendo um momento que tende a fazer a bobina (induzido) girar em torno de seu eixo, no sentido dos ponteiros do relógio, aproximando os pólos de nomes opostos até que a mesma atinja a situação mostrada na fig. 1 "b" (90 graus).

Fig. 1 «b» — Bobina no plano neutro



Nessas condições a bobina (espira) atingiu o plano neutro; esta é uma posição em que o momento de rotação é nulo, porque a distância do eixo da espira (bobina) à linha de ação das forças equivale a zero e é de supor que o movimento deva parar. Isto só aconteceria se o movimento da bobina (espira) fosse lento demais. Normalmente a inércia da bobina faz com que ultrapasse o plano neutro, ao mesmo tempo que haverá uma comutação por meio do comutador que inverte o sentido da corrente na espira (bobina).

Quando isto ocorre, o campo magnético gerado pela bobina também se inverte. Os pólos de nomes iguais estão próximos, e portanto, se repelindo, desenvolve-se um momento de maneira tal, que a bobina continua no seu movimento de rotação, aproximando novamente os pólos de nomes contrários no sentido dos ponteiros do relógio, conforme se pode ver na fig. 1 "c".

Sempre que a bobina (espira) estiver atravessando um plano neutro ou plano de momento nulo, ocorrem estes mesmos fatos, isto é, a corrente na bobina precisa ser invertida pela ação do comutador, para se desenvolver um movimento de rotação continuado em um único sentido.

O comutador é, portanto, indispensável e desempenha um papel muito importante no funcionamento do motor de C.C.

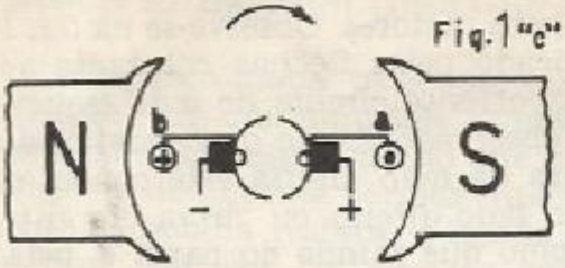


Fig. 1 «c» — Bobina em posição contrária à da fig. 1 «a»

O motor de C.C. básico como aparece na fig. 1 tendo uma única espira (bobina) seria impraticável; usa-se apenas para expor a teoria de funcionamento dos motores. Sempre que a bobina passar por um plano neutro terá pontos mortos, o momento é nulo e o binário motor que desenvolve é pulsante e isto introduz uma trepidação na rotação da bobina.

Em um induzido dotado com muitas bobinas se obtém um momento de rotação maior, e se elimina o efeito daqueles pontos em que o momento se anula. Nos induzidos deste tipo, apenas faz contato com as escovas uma parte mínima do número total de bobinas que são as que em um dado instante ficam sob comutação. A máxima diferença de potencial entre as escovas verifica-se quando estas se encontram em comunicação direta com os condutores, próximos do plano de inversão magnética.

Obtêm-se os melhores resultados quando os motores utilizados na prática empregam um grande número de bobinas no induzido e um número elevado de lâminas no comutador, como acontece no induzido de um gerador.

Não há diferença entre a construção do induzido de um gerador e do motor de C.C. O borne negativo de um motor é o de entrada da corrente fig. 1, e por isto é ligado ao borne negativo do gerador de alimentação.

Capítulo 2

ENROLAMENTO DO INDUZIDO

Introdução.

O bobinamento do induzido é formado pela combinação de espiras como esta que acabamos de ver. Os condutores são colocados na periferia do induzido aos pares (de maneira a formarem espiras como a que foi imaginada acima), ligados entre si de forma a se obter cadeias contínuas de condutores, em que as f.e.m. induzidas, sejam todas combinadas em um mesmo sentido, e ocupando os condutores de cada cadeia, posições semelhantes em relação as peças polares, a fim de se obter um potencial igual.

TIPOS DE INDUZIDOS

Os induzidos usados no motores, de C.C. dividem-se em duas classes gerais: induzido de "anel" e o tipo de "tambor".

Induzido em anel de Gramme.

O núcleo do induzido é formado por um cilindro oco de ferro em forma de anel, sobre o qual os condutores são enrolados. Cada bobina é ligada ao princípio da bobina seguinte, formando assim um espira contínua ou fechada em redor do núcleo de ferro. A intervalos regulares são tiradas derivações para as lâminas do comutador. Neste enrolamento, as voltas de fio não se entrecruzam; é simples em sua construção e em suas conexões elétricas.

As principais vantagens que oferece este tipo de enrolamento são

a) Pode adaptar-se a qualquer número de pólos, se não há alguma objeção devido aos limites de tensão;

b) É melhor ventilado, pelo fato de ser a sua constituição de tipo aberto;

c) Como as voltas de fio não se entrecruzam, torna-se fácil a análise visual dos defeitos elétricos e magnéticos do circuito.

As desvantagens são as seguintes:

a) Os condutores que ficam do lado de dentro do anel não cortam nenhuma linha de força permanecendo inativos, aumentanco assim a resistência elétrica do induzido, e se comportam como simples ligações das partes ativas dos condutores que se encontram em frente às faces polares, que são os condutores ativos;

b) O enrolamento do anel de Gramme requer uma quantidade relativamente grande de cobre devido a pequena proporção de condutores ativos;

c) Este tipo de bobinamento requer maior trabalho porque não pode ser feito com bobinas pré-fabricadas, o que o torna muito dispendioso;

d) A resistência do circuito magnético aumenta com a espessura do anel do induzido, etc.

Este tipo de induzido e de enrolamento era usado nos projetos primitivos. Atualmente é de emprego muito raro nos modelos modernos de máquinas elétricas rotativas.

Induzido tipo Tambor.

O núcleo deste induzido é composto de um cilindro ou tambor. Os condutores ou bobinas são colocados em ranhuras existentes, cavacas na superfície do induzido, fig. 2, e em sentido paralelo ao eixo do mesmo. Os condutores ou bobinas são ligados uns aos outros nas extremidades, na parte dianteira e traseira do tambor.

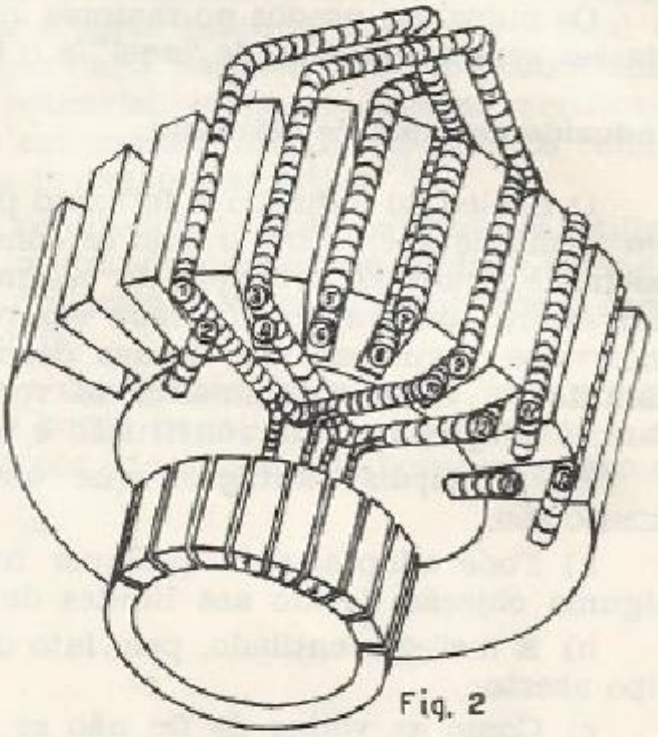


Fig. 2

Fig. 2 — Diagrama em perspediva, mostrando a posição relativa que ocupam nas ranhuras os dois lados de uma bobina qualquer.

Há dois condutores ativos por espira, e os lados da espira estão distanciados um do outro, por cerca de um passo polar entre cada espira, distância equivalente de centro a centro de pólos adjacentes. As f.e.m. induzidas nos dois condutores ativos de uma espira qualquer atuarão no mesmo sentido no circuito da espira, e a f.e.m. total por espira será o dobro da que é obtida com o bobinamento no induzido tipo anel.

Para uma mesma capacidade será empregado menor quantidade de fio num induzido em tambor que no induzido em anel, com a vantagem de menor resistência.

FORMA DE REPRESENTAR AS BOBINAS

Cada bobina é formada por um conjunto de espiras, e a cada espira correspondem dois condutores; nas figs. 3 e 4, estão representadas as bobinas com quatro voltas de fio. O grupo de condutores que formam o lado da bobina constitui um "elemento". Elemento é o conjunto das espiras que é necessário percorrer para passar de uma lâmina do comutador para a sucessiva. "ab" e "cd" são elementos de bobina, figs. 3 e 4. Sempre haverá duas vezes tantos elementos quantas bobinas houver.

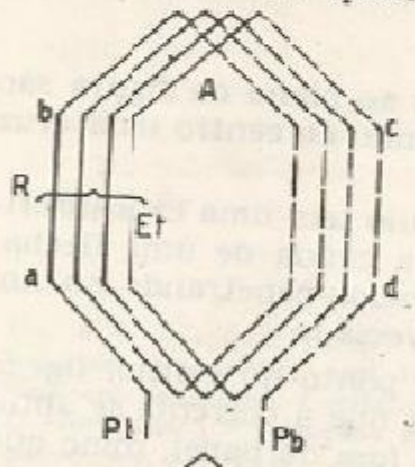
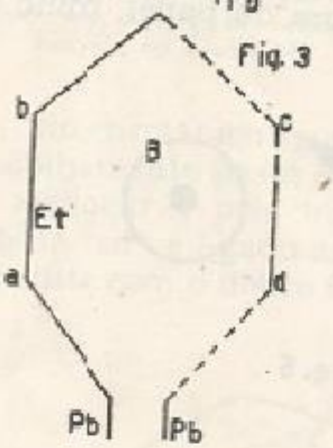


Fig. 3



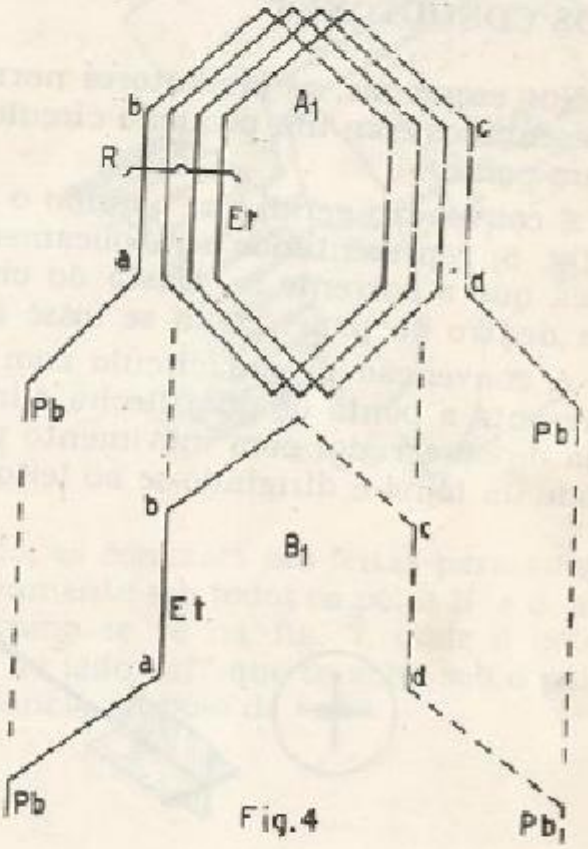


Fig. 4

Fig. 3 e 4 — A e B representam o enrolamento imbricado. A_1 e B_1 representam um bobinamento ondulado. E — Elemento ou lado de bobina. R. — ranhura. ab e cd lados de bobina. Pb — ponta de bobina.

O lado esquerdo de cada bobina que aparece nas figs., em traços cheios, está disposto na parte de cima de uma ranhura, e seu outro lado direito em traços interrompidos está no fundo de outra ranhura, mas sob o pólo seguinte.

Nas figs. 3B e $4B_1$, temos simplificada ainda mais a representação das bobinas. Cada traço vertical representa então um lado de bobina (mesmo quando há vários condutores em cada lado de bobina) e não um só condutor, ou seja, que se usa uma única espira para representar uma bobina com várias voltas de fio, a fim de simplificar a representação dos enrolamentos, para que possam ser interpretados com maior facilidade e rapidez.

No bobinamento imbricado, cada ponta de bobina "Pb", fig. 3, é ligada a duas láminas adjacentes do comutador, e por isso tem seus extremos próximos um do outro. No enrolamento ondulado, cada ponta de bobina "Pb" fig. 4, é ligada a duas lâminas afastadas uma da outra, por isso seus extremos estão bifurcados. É importante que o fim de uma bobina e o princípio da seguinte se achem sob pólos de diferente polaridade, para que suas f.e.m. se somem e possam atuar em um mesmo sentido.

SIMBOLOS CONVENCIONAIS PARA O SENTIDO DA CORRENTE NOS CONDUTORES

Nos esquemas, os condutores normais ao plano da figura são representados com um pequeno círculo, tendo ao centro uma cruz ou um ponto.

É convenção geral, que quando o círculo tem uma cruz inscrita, fig. 5, representando simbolicamente a cauda de uma flecha, indica que a corrente se afasta do observador penetrando no fio, para dentro do papel como se fosse atravessá-lo.

A convenção de um círculo com um ponto no centro, fig. 5, representa a ponta de uma flecha e indica que a corrente se aproxima do observador com movimento para fora do papel, como que saindo da folha e dirigindo-se ao leitor.

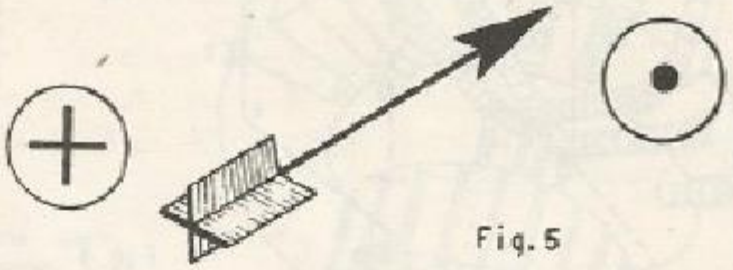


Fig. 5

Fig. 5 — Convenção geral para indicar o sentido da corrente. A cruz representa a parte posterior de uma flecha, indica que a corrente se afasta do observador. O ponto representa a ponta de uma flecha para indicar a direção da corrente saindo do papel aproximando-se do observador.

TIPOS DE ENROLAMENTO DO INDUZIDO

Os induzidos do tipo de tambor podem ser bobinados de duas maneiras distintas: com enrolamento "imbricado" ou bobinamento "ondulado".

A diferença entre estes dois tipos de enrolamento, é o método usado para ligar os elementos do mesmo. No bobinamento imbricado, os passos dianteiro e traseiro têm que diferir entre si pelo número de dois. No enrolamento ondulado, o passo dianteiro pode ser igual ao passo traseiro. As figs. 6 e 7 mostram a diferença principal entre os bobinamentos imbricado e ondulado.

No bobinamento imbricado, as ligações se sobrepõem, um lado de bobina "ab" debaixo de um pôlo, fig. 6, está ligado a um outro lado de bobina "cd" que ocupa uma posição correspondente sob o pólo adjacente. Este segundo lado de bobina "cd" é ligado, para trás, a um outro lado de bobina "ef" situado sob o mesmo pólo que "ab", mas com um deslocamento de dois ou mais lados de bobina em relação a este.

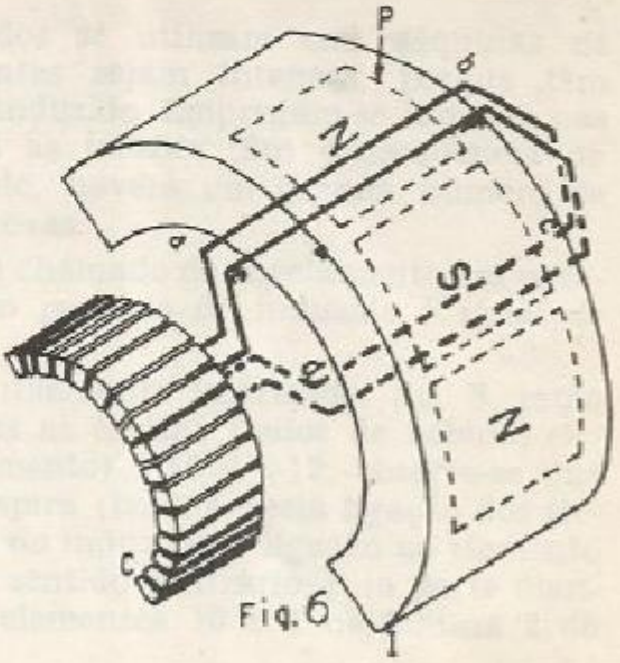


Fig. 6

Fig. 6 — Diagrama parcial de induzido tipo tambor com bobinamento imbricado. I induzido. C comutador. P posição dos pólos. ab, cd e ef lados de bobina ou elementos.

No enrolamento ondulado, as conexões são feitas para adiante, o bobinamento passa sucessivamente sob todos os pólos N e S antes de alcançar o pólo inicial, como se vê na fig. 7, onde o lado de bobina "cd" é ligado adiante ao lado "ef" que se acha sob o pólo N seguinte com o dobro da distância ao pólo de "ab".

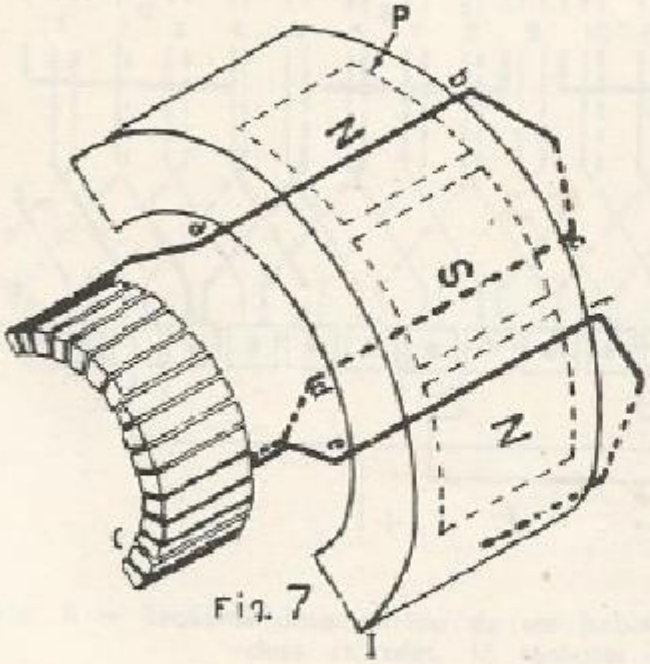


Fig. 7

Fig. 7 — Diagrama parcial de um induzido tipo tambor com enrolamento ondulado. — Induzido. C — comutador. P — posição dos pólos. ab, cd e ef — lados de bobina ou elementos.

Capítulo 3

BOBINAMENTO IMBRICADO

Enrolamento imbricado ou em paralelo.

Os enrolamentos imbricados se utilizam em máquinas de baixa tensão, onde as correntes sejam intensas, porque têm vários circuitos em paralelo no induzido. Empregam-se também nas máquinas grandes para todas as tensões. Em conseqüência de ter varios circuitos em paralelo, haverá um grande número de pólos e um número igual de escovas.

O bobinamento imbricado é chamado de enrolamento em paralelo, e o número de ramas em paralelo do induzido é igual ao número de pólos

No desenvolvimento do enrolamento imbricado, fig. 8, estão indicados em traços mais fortes as espiras (lados de bobina, elementos ou unidades do enrolamento) 1-10 e 3-12; observe-se que depois de formada a primeira espira (bobina) pela ligação dos elementos 1 e 10 na parte traseira do induzido, a ligação ao elemento seguinte é feita retornando em sentido contrário, pela parte dianteira para fazer a junção dos elementos 10 e 3 na lâmina 2 do comutador.

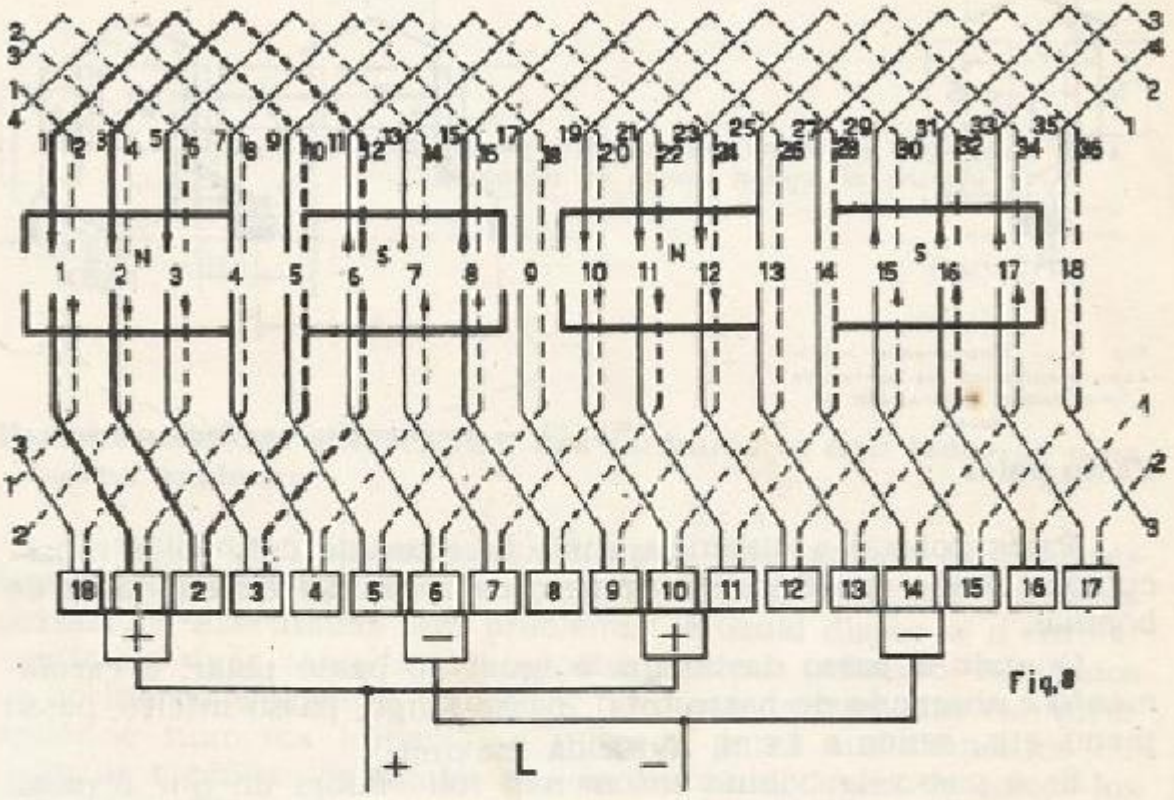


Fig. 8 — Esquema desenvolvido de um bobinamento imbricado progressivo de duas camadas, 18 ranhuras e quatro pólos.

Passo do enrolamento.

No enrolamento dos induzidos dos motores de C.C. há três passos a considerar:

a) "Passo da bobina", largura ou distância que separa as ranhuras nas quais são colocados os dois lados de uma bobina, é representado por "Y", e determinado pelo intervalo da conexão bc. figuras 9 e 10;

O passo da bobina é chamado também de "passo traseiro", "primeiro passo", "passo posterior" ou passo dos condutores do lado oposto ao comutador, seu símbolo é "y_1".

b) "Passo dianteiro", distância entre os lados de bobina que devem ser ligados entre si na mesma lâmina do comutador, é representado por "y_2", figuras 9 e 10. Este passo é chamado também de "passo parcial", "segundo passo" ou passo anterior.

c) "Passo do enrolamento", distância entre os inícios de duas bobinas consecutivas, tem por símbolo "y", figuras 9 e 10.

O passo do enrolamento é determinado pela diferença (bobinamento imbricado) ou pela soma (enrolamento ondulado) dos passos traseiros "y_1" e dianteiro "y_2".

Os passos podem definir-se em: número de ranhuras, lâminas do comutador, graus, etc.

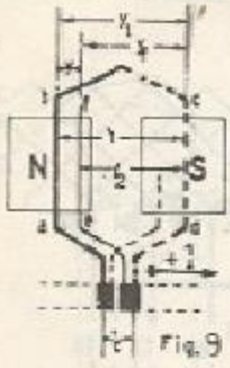


Fig. 9 — Enrolamento imbricado progressivo, as pontas de uma mesma bobina não se cruzam.

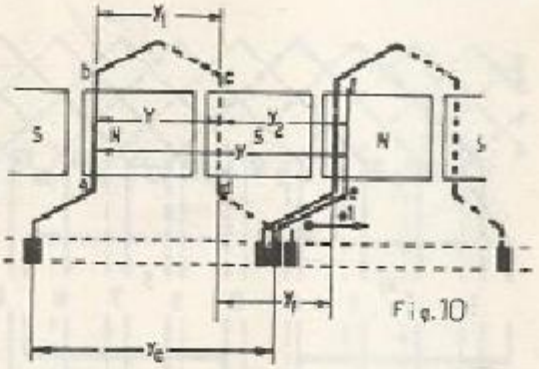


Fig. 10 — Bobinamento ondulado progressivo.

Passo polar.

Passo polar é a distância entre os eixos de dois pólos consecutivos, sendo expresso em número de ranhuras ou em lados de bobinas.

Quando o passo da bobina é igual ao passo polar, o enrolamento é chamado de passo total, passo longo, passo inteiro, passo pleno, etc., sendo a f.e.m. induzida máxima.

Se o passo da bobina for menor (ou maior) do que o passo polar, os bobinamentos são chamados de passo fracionário, passo reduzido, passo parcial, etc., e a f.e.m. induzida é menor do que no enrolamento de passo pleno.

Cálculo dos passos do enrolamento imbricado.

Os passos traseiro e dianteiro devem sempre ser ímpares e diferir de 2, a fim de que seja possível fazer um enrolamento fechando-se sobre si mesmo, isto é

$$y_1 = y_2 \pm 2 \qquad (1)$$

Quando o passo traseiro é maior do que o passo dianteiro, ou quando os extremos de uma bobina simples, ou as pontas de uma seção de uma bobina múltipla não se cruzam, diz-se que o enrolamento é "progressivo", fig. 9. É representado na equação (1) com o sinal positivo (+) porque o enrolamento avança no sentido da marcha dos ponteiros do relógio, olhando-se o induzido do lado em que está o comutador.

Quando o passo dianteiro é maior que o traseiro, ou quando há cruzamento das pontas de uma mesma bobina, fig. 11, o bobinamento é "regressivo", isto é, avança no sentido inverso ao da marcha dos ponteiros do relógio, olhando o induzido desde o lado do comutador. Na equação (1) é representado pelo sinal menos (—).

O passo dianteiro pode ser maior ou menor que o traseiro, porém nunca igual.

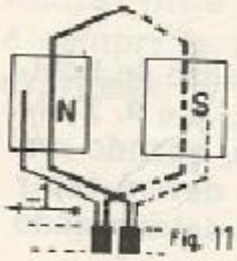


Fig. 11 — Bobinamento imbricado regressivo, as pontas da mesma bobina se cruzam.

Posições relativas que ocupam nas ranhuras os dois lados de uma bobina qualquer.

Como nos enrolamentos do induzido tipo tambor, as conexões frontais do bobinamento se cruzam, e para que tais conexões possam ser executadas sem problemas, é usual dispor-se o enrolamento em duas camadas sobrepostas sobre o induzido. Aos lados de bobina ou elementos colocados na parte de cima das ranhuras aplica-se números ímpares, e número pares aos elementos ou lados de bobinas dos fundos das ranhuras, ao invés de colocá-los lado a lado. Em cada camada podem-se dispor 1, 2, 3 ou mais lados de bobinas, isto é, 2, 4, 6 ou mais lados de bobinas ou elementos por ranhura.

Quando um dos lados de uma bobina fica no fundo de uma ranhura, o outro lado se situará em cima, noutra ranhura, em campo de polaridade oposta, como mostra o desenho em perspectiva da fig. 2, (lados de bobina 1 e 10), onde é mostrada apenas uma parte do enrolamento da fig. 8.

Os dois lados da bobina que resultam imersos no pacote laminado do induzido, no comprimento do trecho de ranhura, é o que se chama parte ativa da bobina.

Tabela de bobinamento.

Uma tabela de enrolamento oferece o valor prático da verificação de um projeto, para verificar se cada lado de bobina foi incluido uma única vez, e se fecha no mesmo lado de bobina tomado como ponto de origem.

Exemplo: Tabela do plano de enrolamento da fig. 8.

Iniciando pelo lado de bobina n.º 1, o bobinamento se desenvolverá de acordo com o seguinte esquema:

1 — 10 — 3 — 12 — 5 — 14 — 7 — 16 — 9 — 18 — 11 — 20 — 13 — 22 — 15 — 24 — 17 — 26 — 19 — 28 — 21 — 30 — 23 — 32 — 25 — 34 — 27 — 36 — 29 — 2 — 31 — 4 — 33 — 6 — 35 — 8 — 1.

Vê-se que o enrolamento cerra-se exatamente no mesmo lado de bobina n.º 1, tomado como ponto de origem.

Determinação do passo da bobina.

A largura de lado a lado de bobina, ou seja, o "passo de bobina" é determinado pelo intervalo da conexão bc, figs. 6 e 9. Deve ser igual ou quase igual ao passo polar, de forma que, quando um dos lados de bobina está sob um pólo norte, o outro deverá estar sob um pólo sul. O passo da bobina ou passo traseiro é determinado pelas formulas:

$$Y = \frac{\text{n.º de ranhuras}}{\text{n.º de pólos}} \qquad (2)$$

$$y_1 = \frac{\text{n.º de elementos}}{\text{n.º de pólos}}$$

onde: Y = passo da bobina.
y_1 = passo traseiro.

Exemplo: Determinar o passo da bobina, o passo traseiro e o passo dianteiro, do induzido de um motor tetrapolar que tem 18 ranhuras fig. 12. Bobinamento imbricado de duas camadas, com dois lacos de bobina em cada ranhura.

$$Y = \frac{18 \text{ ranhuras}}{4 \text{ pólos}} = 4{,}5$$

Este valor não satisfaz por não ser inteiro e ímpar. Pode ser tomado por exemplo o valor de 4.

O passo traseiro, como há 36 elementos ou lados de bobina, deverá ser igual a:

$$y_1 = \frac{36 \text{ elementos}}{4 \text{ pólos}} = 9$$

O passo dianteiro (y_2), quando se trata de um enrolamento progressivo, resulta em + 2, e se é regressivo — 2. Neste caso tomamos mais 2 ($y_1 = y_2 + 2$) por se tratar de um enrolamento progressivo com passo dianteiro igual a,

$$y_2 = 7$$

Passo do comutador de enrolamentos imbricados

O passo do comutador é igual à diferença do número de ranhuras entre o passo traseiro e o passo dianteiro, fig. 9, seu valor é sempre a metade do passo resultante "y" e tem a seguinte expressão:

$$y_{co} = y_1 - y_2 = 1 \text{ ou } y_{co} = \frac{y}{2} \qquad (3)$$

Conseqüentemente o passo do comutador resulta "+ 1" para o enrolamento progressivo e — 1 para o regressivo.

Exemplo: No induzido de um motor tetrapolar com 18 ranhuras, fig. 12, o passo traseiro do bobinamento tem um intervalo de 5 ranhuras, o passo dianteiro tem um vão de 4 ranhuras. Determinar o passo do comutador.

$$y_{co} = 5 - 4 = 1$$

O passo do comutador em tal enrolamento vem a ser: $y_{co} = 1$.

Pela fig. 8, vê-se que o enrolamento avança uma lâmina do comutador em cada volta completa; como é progressivo, o passo do comutado será + 1.

Número de lâminas do comutador de enrolamentos imbricados

Para cada bobina é indispensável prever-se uma lâmina no comutador, portanto, o número de lâminas vem a ser:

$$N_c = N = \frac{Z}{2} \qquad (4)$$

onde

N_c = número de lâminas do comutador.

N = numero de bobinas.

Z = número de elementos ou lados de bobina.

Na fig. 12, está representado o diagrama de um bobinamento imbricado de um motor tetrapolar, com um induzido de 18 ranhuras, tendo dois lados-de-bobina em cada ranhura.

Na fig. 8, vê-se o esquema desenvolvido do enrolamento do induzido da fig. 12, imaginando-se cortado o induzido na zona compreendida entre as ranhuras 1 e 18 para planificá-lo.

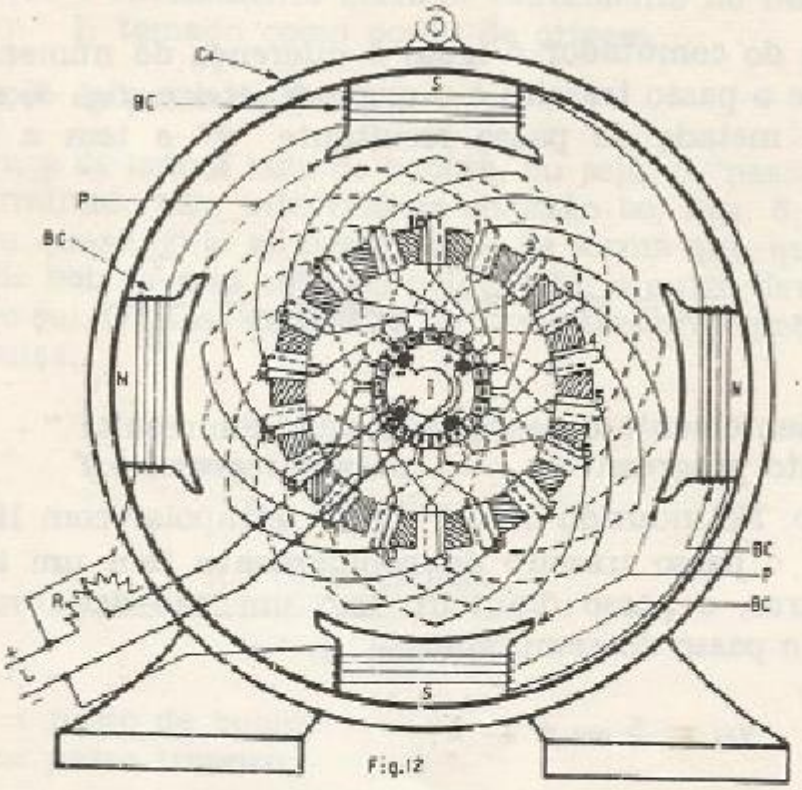


Fig. 12 — Representação desdobrada em forma circular do enrolamento imbricado progressivo do induzido com 18 ranhuras de um motor paralelo tetrapolar. Ca — carcaça. Bc — bobinas de campo. P — pólos. L — linha de alimentação. R — resistência de partida.

A fig. 13 mostra-nos o diagrama da corrente nos condutores do bobinado para a posição do induzido representado nas figuras 8 e 12.

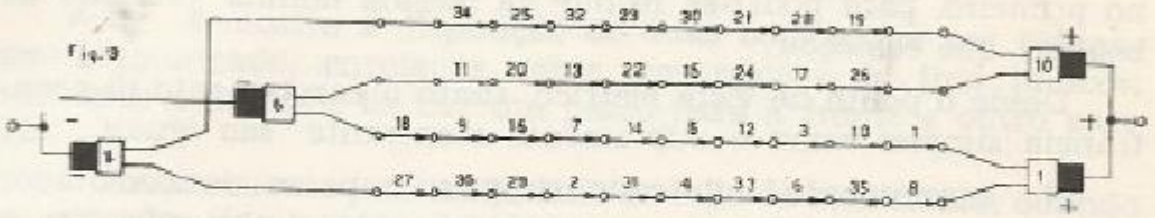


Fig. 13 — Esquema de corrente nos condutores do enrolamento para a posição do induzido representado nas figuras 8 e 12.

Enrolamentos imbricados múltiplos

Nos bobinamentos imbricados simples, o número de ramos ou circuitos em paralelo do induzido é igual ao número de pólos. Logo se o motor for de 4 pólos terá 4 circuitos em paralelo; 8 ramos em paralelo se for de 8 pólos e, assim por diante.

Entretanto para motores de grande capacidade, com baixas tensões e altas intensidades de corrente, é necessário dispor um bobinado imbricado múltiplo para poder subdividir a corrente em dois ou três circuitos (ou enrolamentos simples) que se ligam ao comutador. Normalmente não são usados enrolamentos múltiplos com mais de três circuitos, estes são chamados tríplex. Praticamente o único bobinado múltiplo mais usado é o de dois circuitos, chamado dúplex.

No enrolamento de dois circuitos (ou dois enrolamentos), o primeiro bobinamento, depois de ter dado uma volta em torno do induzido ocupando unicamente ranhuras e lâminas alternadas, fecha-se sobre si mesmo. O segundo enrolamento igual ao primeiro coloca-se nas ranhuras e lâminas vagas do induzido e do comutador, fecha-se também sobre si mesmo, ficando inteiramente separado do primeiro. Este tipo de enrolamento é dúplex, de dupla reentrância ou duplamente reentrante, porque cada enrolamento se fecha sobre si mesmo.

No enrolamento dúplex, duplamente reentrante, as ligações do primeiro enrolamento ligar-se-ão com as lâminas de número ímpar do comutador, enquanto que as conexões do segundo bobinamento se fazem nas lâminas de número par. O passo traseiro e dianteiro do segundo enrolamento são iguais ao do primeiro. Os dois enrolamentos são ligados eletricamente no comutador, com escovas bastante largas, para permitir o fluxo simultâneo de corrente nos dois enrolamentos.

Chama-se enrolamento dúplex reentrante simples, quando com qualquer número de pares de pólos, o número de lâminas é ímpar. Neste caso, o primeiro enrolamento depois de haver percorrido uma vez o induzido, sem fechar-se sobre si mesmo, entra no segundo bobinamento para fazer a segunda volta e reentrar no primeiro, para poder-se fechar na mesma lâmina (ou lado de bobina) que começou.

Desde o ponto de vista elétrico, tanto o enrolamento de reentrância simples como o duplamente reentrante são iguais.

No enrolamento imbricado simples, o passo do comutador "y_{co}" é igual à unidade; em um bobinamento imbricado dúplex $y_{co} = 2$; em um enrolamento tríplex $y_{co} = 3$; etc.

Normalmente o mais utilizado é o enrolamento imbricado múltiplo progressivo.

Conexões equipotenciais

Nos motores multipolares, devido à assimetria do fluxo causado pela imperfeição do circuito magnético, irregularidades no entreferro, excentricidade dos mancais, etc., provocam diferenças ou desigualdades entre as f.e.m. dos diferentes pontos do enrolamento, cujos potenciais deveriam ficar normalmente iguais entre si.

Como alguns destes pontos acham-se ligados por escovas da mesma polaridade, originam-se correntes de compensação que passam pelas escovas. Por ser a resistência deste circuito muito baixa, uma pequena diferença na f.e.m. pode produzir grandes correntes de compensação circulando pelas escovas, produzindo centelhamento que prejudica o comutador e diminui o rendimento do motor.

Para liberar as escovas destas correntes de compensação, ligam-se entre si os pontos do induzido entre os quais deveria existir uma perfeita simetria. Estas ligações chamam-se anéis ou conexões equipotenciais, e podem ser feitas no enrolamento ou no comutador, por condutores de resistência desprezível. As correntes de compensação circularão por estas conexões sem passar pelas escovas.

A corrente de compensação que circula pelas escovas é corrente contínua. A que passa pelas conexões equipotenciais é alternada dando origem a um campo magnético, que reforça o fluxo do motor onde está fraco e, o enfraquece onde é forte. Desta forma as ligações equipotenciais eliminam a própria causa que provoca as correntes de compensação, e melhoram a comutação.

Recapitulação sobre bobinamentos imbricados

No enrolamento imbricado, um lado de bobina "ab", figs. 6 e 9, debaixo de um pólo é ligado a cd, que está sob o pólo adjacente. "cd" é ligado diretamente de volta a um outro lado de bobina "ef", que se acha sob o mesmo pólo que ab.

A fig. 6 mostra a disposição de duas bobinas de um bobinamento imbricado, enroladas sobre um núcleo de tipo tambor, usando-se o processo de dar um passo para a frente e outro para trás.

No bobinamento imbricado visto do lado do comutador, quando as conexões das pontas das bobinas nas lâminas avançam no sentido dos ponteiros do relógio, chama-se "progressivo" ou sem cruzar, é indicado pelo sinal mais (+) fig. 9.

Se por outro lado, nas mesmas condições, o bobinamento avança no sentido contrário aos ponteiros do relógio, tem o nome de "regressivo" ou em cruzamento, sendo indicado pelo sinal menos (—) fig. 11.

O número de lâminas do comutador é igual á metade do número de elementos ou lados de bobina.

O lado de bobina "cd", fig. 6, é ligado para trás a "ef" de volta ao pólo N. inicial.

Os passos traseiro e dianteiro devem ser ímpares e diferir de 2 unidades.

O passo deve ser de um valor tal que os lados opostos de cada bobina caiam sob pólos diferentes.

Partindo-se de uma lâmina do comutador e seguindo-se o bobinamento, chega-se à lâmina adjacente depois de ter percorrido uma só bobina, constituída por um lado embaixo de um pólo e outro lado embaixo do pólo de nome contrário que o segue.

O número de elementos deve ser par, pois os mesmos são ligados aos pares a fim de formarem as bobinas.

Os lados opostos de cada bobina devem cair sob campos de polaridade diferentes, para que as duas f.e.m. nos dois lados da bobina sejam aditivas.

O bobinamento imbricado possui tantos circuitos internos e tantas escovas quanto são os pólos do motor.

Os circuitos internos do enrolamento são agrupados em paralelo através da ligação das escovas. Estas por sua vez, as que têm a mesma polaridade, agrupam-se entre si para formar, respectivamente, o borne positivo e o borne negativo aos quais liga-se a linha de alimentação "L", figs. 8 e 12.

Os enrolamentos imbricados múltiplos são empregados em grandes motores de baixa tensão e elevada intensidade, o que permite subdividir a corrente em vários circuitos e empregar condutores de pequena seção.

Para um enrolamento dúplex, a escova deve ser suficientemente larga para cobrir duas lâminas do comutador; para um bobinamento tríplex a largura da escova deverá cobrir três lâminas, e assim por diante. É muito raro encontrar escovas cobrindo mais de quatro lâminas.

Nos bobinamento mútiplos dúplex, quando cada um dos enrolamentos é fechado sobre si mesmo, se chama de dupla reentrância. Se o mesmo bobinamento, depois de haver percorrido uma vez o induzido tem de fazer uma segunda volta, antes de poder fechar-se na mesma lâmina que começou, é chamado reentrante simples.

No enrolamento imbricado dúplex, o passo do comutador é: $y_{co} = 2$; $y_{co} = 3$, em um enrolamento tríplex, etc.

As conexões ou anéis equipotenciais, proporcionam um caminho de baixa resistência às correntes de compensação, e deverão ser usadas nos enrolamentos de mais de dois pólos com mais de dois circuitos em paralelo.

Capítulo 4

BOBINAMENTO ONDULADO

Enrolamento Ondulado ou em Série

Os enrolamentos ondulados, também denominados em série, são amplamente usados nas máquinas pequenas onde as tensões são elevadas. É também utilizado quando o emprego de um bobinamento imbricado resulte em um condutor de pequena seção ou em muitos condutores em uma ranhura.

O bobinamento ondulado tem somente dois ramos em paralelo, figs. 14, 15 e 16, por isto são freqüentemente chamados de enrolamentos de dois circuitos. Oferecem a vantagem de dar uma f.e.m. mais elevada que um enrolamento imbricado, com o mesmo número de espiras, a mesma velocidade e o mesmo fluxo dos pólos. Apenas duas escovas são necessárias, independentemente do número de pólos, embora seja preferível empregar-se um número de escovas igual ao número de pólos, porque resulta um comutador mais barato. Entretanto, para subdividir a corrente e diminuir a largura das escovas, pode-se instalar uma ou mais escovas por pólo, havendo mais de dois pólos.

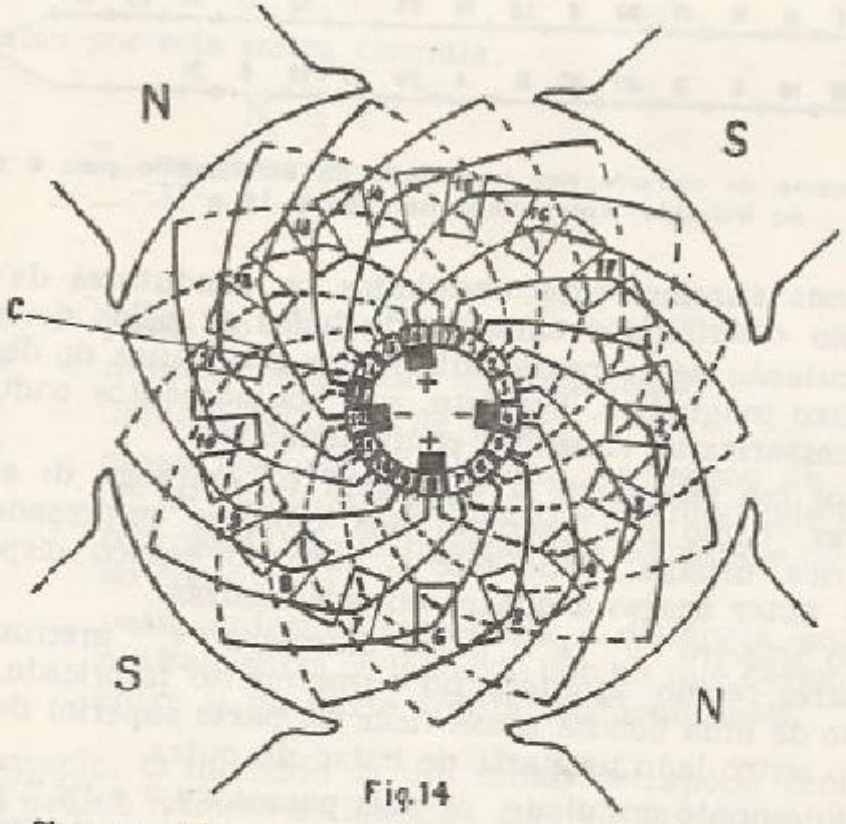


Fig.14

Fig. 14 — Diagrama polar do enrolamento mostrado na fig. 15. 17 ranhuras, quatro pólos. C comutador.

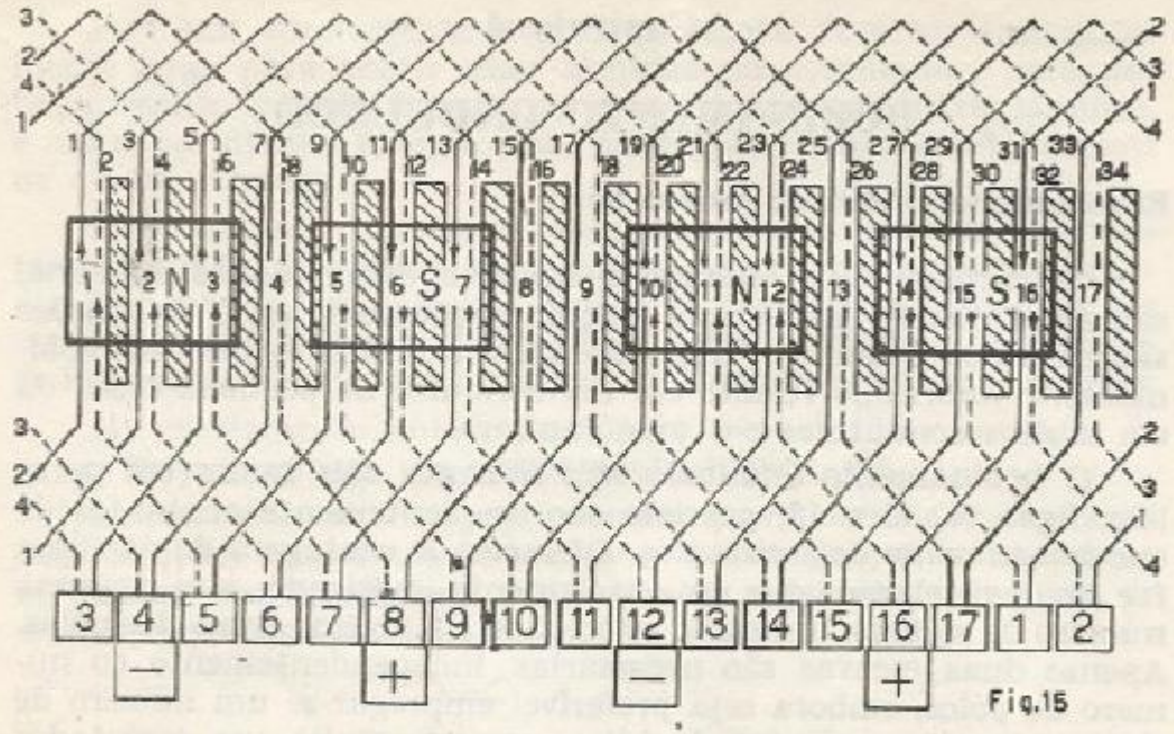


Fig. 15 — Bobinamento ondulado em duas camadas, 17 ranhuras, quatro pólos, passo da bobina 1-5, passo do comutador 1-9.

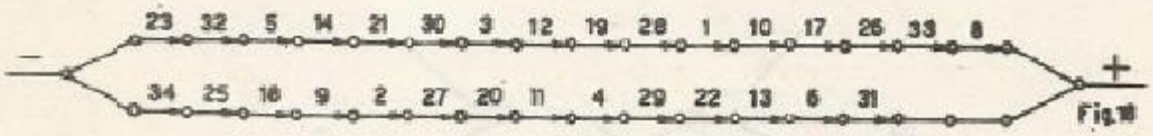


Fig. 16 — Esquema da corrente nos condutores do enrolamento para a posição do induzido representado nas figuras 14 e 15.

Como nos enrolamentos ondulados os condutores de cada circuito estão distribuídos embaixo de todos os pólos do motor, não há circulação de correntes alternadas por causa do desequilíbrio do fluxo magnético. Por isto, nos bobinamentos ondulados não são necessárias as conexões equipotenciais.

Há casos em que existe a vantagem no emprego de apenas duas escovas, como por exemplo nos motores empregados na tração elétrica urbana, dado que o limitado espaço disponível torna difícil obter acesso a quatro ou seis escovas.

O passo traseiro "y_1" e o passo dianteiro "y_2" precisam ser ambos ímpares, como acontece no enrolamento imbricado, para que um lado de uma bobina possa ficar na parte superior de uma ranhura e o outro lado na parte de baixo de outra.

No bobinamento ondulado, os dois passos "y_1" e "y_2" podem ser idênticos, sendo o caso contrário com o enrolamento imbricado, em que o passo dianteiro pode ser maior ou menor que o traseiro, mas nunca igual.

Passo médio

O passo médio é dado pela expressão

$$y_m = \frac{y_1 + y_2}{2} \qquad (5)$$

e tarto pode ser par como ímpar, porém ambos devem ser números ímpares, a fim de que seja possível formar um enrolamento fechando-se sobre si mesmo.

Passo do comutador de enrolamentos ondulados

Passo do comutador é o número de lâminas compreendido entre as pontas de uma bobina qualquer. O passo do comutador num bobinamento ondulado é diferente do enrolamento imbricado.

No bobinamento ondulado é igual à soma aritmética do número de ranhuras abraçadas pelas conexões das pontas do lado de trás do induzido, "Y" fig. 10, com o número de ranhuras que as conexões das pontas abraçam do lado do comutador, "y_2" da mesma fig. 10. Assim:

$$Y_{co} = Y + y_2 \qquad (6)$$

ou então por esta outra fórmula;

$$Y_{co} = \frac{N_c \pm 1}{P} \qquad (7)$$

onde

Y_{co} = passo do comutador.
N_c = número de lâminas do comutador.
P = número de pares de pólos.
Y = passo posterior da bobina ou "passo da bobina" em n.º de ranhuras. Representa a amplitude das bobinas, representando as ligações dos elementos do lado oposto ao comutador.
y_2 = passo anterior, representa a distância, em n.º de ranhuras, entre os lados de bobina que devem ser ligados entre si na parte frontal do comutador.

Exemplo: O induzido de um motor tetrapolar tem 17 ranhuras e o mesmo número de lâminas, fig. 14. O número de ranhuras que formam o vão da bobina do lado de trás do induzido é $Y = 5$, o número de ranhuras abraçadas pelas conexões do lado do comutador é $y_2 = 4$. Pede-se determinar o passo do comutador.

$$Y_c = 5 + 4 = 9 \text{ ou } Y_{co} = \frac{17 - 1}{2} = 9$$

O passo do comutador deverá ser igual a 9 lâminas.

Enrolamento progressivo e regressivo

O bobinamento, visto do lado do comutador, depois de dar uma volta pelo induzido a partir de um certo lado de bobina que cai em uma ranhura e uma lâmina, à direita de seu ponto inicial, fig. 10, tem o nome de "progressivo".

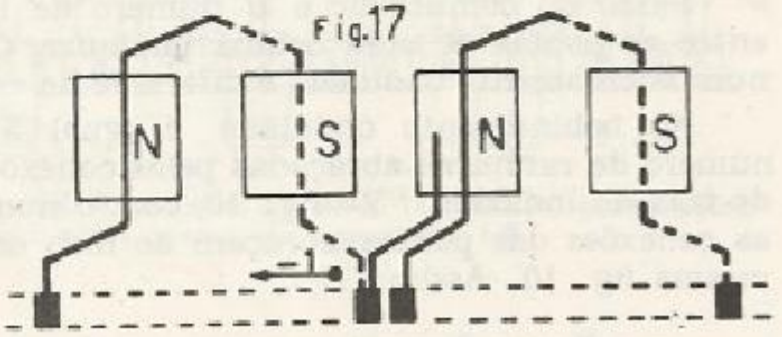


Fig. 17 — Enrolamento ondulado regressivo.

Se nas mesmas condições anteriores, o enrolamento cai em uma ranhura e uma lâmina à esquerda de seu ponto de partida, fig. 17, vem a chamar-se "regressivo".

O sinal mais (+) indica que se trata de um bobinamento "progressivo" e o sinal menos (—) de um enrolamento "regressivo"

Número de lâminas do comutador dos enrolamentos ondulados

Como no enrolamento imbricado, no bobinamento ondulado o número de lâminas do comutador coincide com o número de bobinas.

$$N_c = \frac{Z}{2}$$

onde

N = número de lâminas do comutador.

Z = número de elementos ou lados de bobina.

Por outro lado, temos que o número de lâminas do comutador é igual ao número de pares de pólos multiplicado pelo passo médio e mais um, ou menos um, segundo a fórmula:

$$N_c = P \cdot y_c \pm 1 \qquad (8)$$

onde

N_c = número de lâminas do comutador.

P = número de pares de pólos.

y_m = passo médio.

Em um bobinamento ondulado se "P" é par, correspondendo a 4, 6 ou 8 pólos, o produto "P . y_m" é sempre par, de forma que N_c será ímpar.

Se o passo médio e o número de pólos são ímpares, tanto o número de lâminas do comutador como o de bobinas serão pares. Se o passo médio for par e o número de pares de pólos ímpar, o número de lâminas do comutador e o de bobinas serão ímpares.

Exemplo: Na fig. 15, está representado o esquema do induzido do motor tetrapolar da fig. 14, onde o passo médio de seu enrolamento tem um valor de "y_m — 9". Aplicando-se a fórmula (8) para achar o número de lâminas teremos que:

$$N_c = 2 \cdot 9 - 1 = 17; \text{ e } N_c = 2 \cdot 9 + 1 = 19$$

Como o enrolamento da fig. 15 é regressivo, será preciso um comutador com 17 lâminas.

Recapitulação sobre enrolamentos ondulados

Só há dois caminhos através do bobinamento ondulado com qualquer número de pólos.

Os enrolamentos ondulados não precisam de conexões equipotenciais.

No que concerne ao sentido e à grandeza da f.e.m. induzida no bobinamento, nenhuma diferença faz se a conexão em vez de voltar ao pólo norte inicial (como acontece nos enrolamentos imbricados) avança para o próximo pólo norte, figs. 7, 10, 14, 15 e 17.

O número de lâminas do comutador é igual ao número de bobinas.

No bobinamento ondulado, depois de ser o induzido contornado uma vez, se o enrolamento coincidir com uma lâmina a direita é progressivo, se coincidir com uma à esquerda da lâmina inicial será regressivo, figs. 10 e 17 respectivamente.

Os passos traseiro e dianteiro devem ser ímpares.

Na fig. 14 está representado o esquema de um enrolamento ondulado de um induzido, com 17 ranhuras, de um motor tetrapolar, onde se encontram 34 elementos ativos alojados em ranhuras.

A fig. 15 é o esquema desenvolvido do bobinamento do induzido da fig. 14, imaginariamente cortado entre as ranhuras 1 e 17. As pontas das setas mostram o sentido da f.e.m.

A fig. 16 mostra-nos o diagrama da corrente nos condutores do bobinado para a posição do induzido representado nas figuras 14 e 15. As espiras 7-16 e 15-24 não participam da f.e.m. por estarem curto-circuitadas pelas escovas.

Enrolamento série-paralelo

O tipo mais comum de enrolamento série-paralelo é o ondulado, podendo ser o número de circuitos maior que o número de pólos. Sabe-se que no enrolamento ondulado simples, o número de vias ou circuitos do induzido é sempre dois, com qualquer número de pólos. Sendo 4 o número de circuitos, o enrolamento é chamado ondulado-duplo; se o número de vias é 6, ondulado-triplo.

Assim como nos enrolamentos simples em série, são suficientes dois jogos de escovas sobre o comutador, sendo necessário que a largura da escova abrace tantas lâminas quantos são os circuitos (ou enrolamentos).

Com o enrolamento série-paralelo, aproveitam-se as vantagens da distribuição de corrente em várias vias dos enrolamentos imbricados e a regularidade e equilíbrio da f.e.m. dos bobinamentos ondulados.

Outra das vantagens do enrolamento série-paralelo é a de não precisar conexões equipotenciais, já que os condutores de um dos bobinamentos servem simultaneamente de conexões para outro enrolamento.

O processo para o enrolamento dúplex ou triplex é o mesmo que o empregado para o simples. No bobinamento ondulado simples, depois de ser contornado uma vez o induzido, o enrolamento deve coincidir com uma lâmina imediata à inicial. No enrolamento série-paralelo, após ter completado a primeira volta, se o enrolamento é ondulado-duplo deve coincidir com uma lâmina situada em terceiro lugar (para a direita ou para a esquerda) imediato à que partiu.

Bobinas múltiplas

Apenas têm sido ilustrados os enrolamentos, onde o número de ranhuras coincide com o de lâminas, para maior clareza e melhor assimilação desta subjetiva técnica de enrolamento dos motores elétricos.

Não obstante, em máquinas de grande capacidade, para melhorar a comutação há necessidade de fazer o comutador com maior número de lâminas, porque, segundo as normas, a tensão entre lâminas adjacentes não deve ser superior a 16 volts aproximadamente. Neste caso, cada bobina do induzido consta de várias bobinas parciais que têm o nome de bobinas múltiplas, ou seja, bobina dupla, tripla, quádrupla etc.

Em motores cujo comutador dispõe de um número suficiente de lâminas, caso se usassem dois lados de bobina em cada ranhura, seria necessário um grande número de ranhuras. Por razões construtivas, este número não pode ser muito aumentado

porque haveria necessidade de se fazer o induzido com maior diâmetro. Para evitar isto, colocam-se mais de dois lados de bobina em cada ranhura, reduzindo assim o número destas e obtendo-se maior largura do dente.

O modo de fazer a colocação dos elementos em cada ranhura e a forma de numerar e ligar estas bobinas, em nada difere do que foi explicado para os enrolamentos em que cada ranhura comporta apenas dois lados de bobina.

Capítulo 5

COMUTAÇÃO

Ação do comutador em um motor de C.C.

O comutador faz com que a corrente nas espiras do induzido seja invertida ao passar de um pólo para outro, sendo ao mesmo tempo curto-circuitadas pelas escovas.

A inversão da corrente no momento em que os pólos de nomes contrários se defrontam e o curto-circuito instantâneo das espiras, provocado pela inversão do valor da corrente, de seu valor máximo positivo para o máximo negativo, provoca determinados fenômenos chamados de "comutação".

Por conseguinte, é importante que a comutação se processe de uma maneira uniforme com qualquer carga, sem produzir centelhas, pois da comutação depende o bom funcionamento do motor.

REAÇÃO DO INDUZIDO

Com um motor sem carga, o campo magnético formado pelo enrolamento dos pólos ou bobinamento indutor é distribuído de modo simétrico em relação ao eixo polar ou linha que passa pelos centros dos pólos N e S.

No motor bipolar da fig. 18, a linha "Ln", perpendicular ao eixo do campo magnético ou eixo "Ep" (direção do fluxo) e a linha neutra física coincidem neste caso com a linha ou eixo geométrico neutro, linha "a-b" da fig. 18.

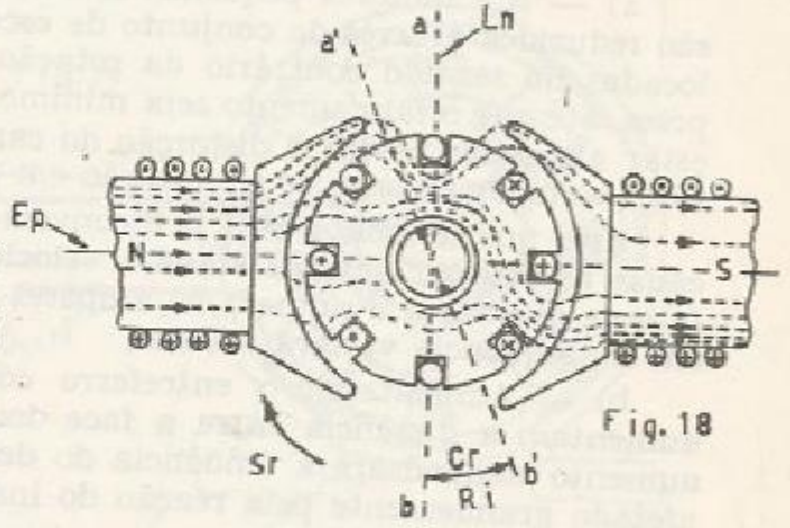


Fig. 18

Fig. 18 — Reação da armadura ou reação do induzido. ab — eixo geométrico neutro. a' b' — eixo do campo em oposição (nôvo plano neutro).

Ln — linha neutra original. Ep — eixo dos pólos do campo indutor. Cr — campo resultante. Sr. — sentido de rotação. Ri — reação do induzido.

Quando se aplica carga ao motor, a corrente que circula através da armadura produzirá um campo magnético em torno das bobinas do induzido como resultado desta corrente, cuja reação sobre o campo indutor será tal que se oponha ao movimento de rotação do induzido, de acordo com a lei de Lenz. A presença deste segundo campo em oposição, distorce o campo principal produzido pelas bobinas indutoras e determina um desvio do plano neutro de comutação (linha "a-b" fig. 18) no sentido contrario da rotação. Este efeito é conhecido como "reação do induzido", "Ri" fig. 18.

CONSEQÜÊNCIAS DO DESVIO DO PLANO NEUTRO

Se a posição das escovas é mantida no plano neutro no momento em que as bobinas passam pela zona de comutação, as mesmas são postas em curto-circuito pelo fato de serem as duas lâminas correspondentes do comutador colocadas em curto pela escova. Haverá um forte centelhamento entre a escova e o comutador no instante da ruptura ao colocar em curto bobinas que têm corrente induzida causada pela densidade do fluxo da reação do induzido existente na zona neutra. Aumentando esta reação à medida que a corrente de carga aumenta, e quanto mais espiras tiver a bobina induzida, maior será a corrente de curto-circuito e mais desastrosa a corrente de ruptura quando as lâminas curto-circuitadas deixem as escovas, porque esta corrente de ruptura produz um arco elétrico que fere o comutador, retirando-lhe minúsculas partículas de cobre de efeito grandemente prejudicial para este último.

NEUTRALIZAÇÃO DO PLANO NEUTRO

Empregam-se vários procedimentos para neutralizar o desvio do plano neutro ou contrabalançar a f.e.m. de auto-indução:

a) — Nos motores pequenos os efeitos da reação do induzido são reduzidos através do conjunto de escovas, que podem ser deslocadas no sentido contrário da rotação em relação à linha dos pólos, até que o faiscamento seja mínimo, isto é, as escovas devem estar atrasadas devido à distorção do campo pela reação do induzido, no melhor ponto de comutação em plena carga.

Este procedimento tem o inconveniente que ao serem deslocadas as escovas ficará afetada a velocidade do motor devido ao fato de que varia o número de ampères-voltas desmagnetizante, e em conseqüência variará o fluxo;

b) — Aumentando o entreferro com pólos chanfrados que aumentam a distância entre a face dos pólos e o induzido. Este aumento compensará a tendência do desvio de campo e não será afetado grandemente pela reação do induzido;

c) — Com enrolamentos de compensação que consistem de uma série de bobinas embutidas em ranhuras nas superfícies dos

pólos principais. Estas bobinas são ligadas em série com o induzido. Como passa pelas bobinas de compensação a mesma corrente do induzido, mas em direção oposta, o campo por elas gerado vai contrariar o efeito da reação do induzido. Em conseqüência o plano neutro fica estacionário e as escovas não têm que ser removidas;

d) — Pelo emprego de pólos de comutação, de forma que o plano neutro fique sempre exatamente no meio do espaço entre os pólos principais, etc.

PÓLOS DE COMUTAÇÃO, INTERPOLOS OU PÓLOS AUXILIARES

Praticamente todos os motores de corrente contínua, exceto os de pequena potência, são equipados com pólos de comutação ou interpolos quando a reação do induzido é muito grande ou quando a tensão de reatância é maior que dois volts aproximadamente.

Os interpolos são colocados entre os pólos principais (onde existia a zona neutra). Os pólos auxiliares ou pólos de comutação são menores e mais estreitos que os pólos principais, sendo construídos de modo a produzirem uma densidade de fluxo superior ao necessário.

Os entreferros dos interpolos são de dimensões maiores que as usuais; para que o fluxo gerado se conserve proporcional à intensidade da corrente que circula no induzido.

Os pólos de comutação são ligados em série com o induzido e, como por suas bobinas circula a corrente da linha, são enrolados com poucas espiras de fio relativamente grosso, fig. 19.

Fig. 19

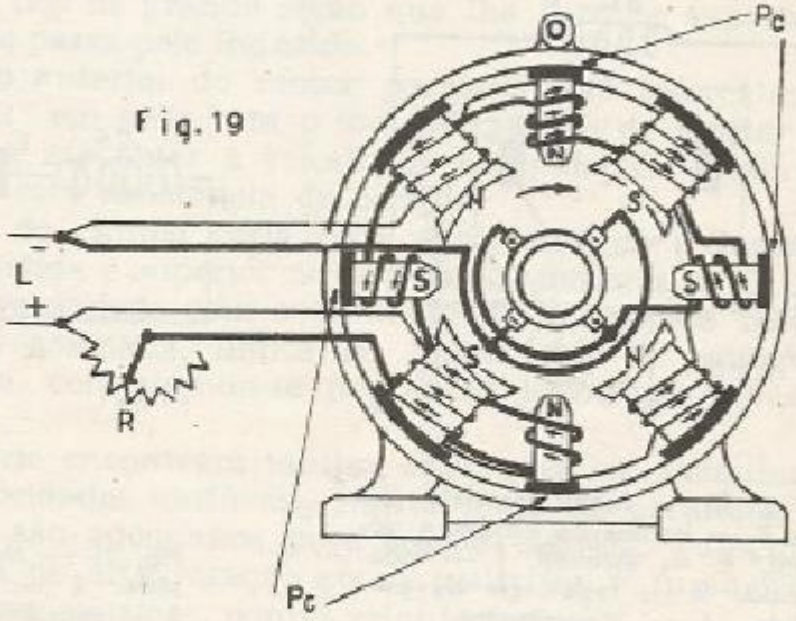


Fig. 19 — Motor tetrapolar. Pc — pólos de comutação. L — linha de entrada. R — resistência de partida.

O campo magnético dos pólos de comutação é da mesma polaridade do pólo principal anterior, no sentido da rotação do motor, (assim N , n , S , s ,) e induzem nas bobinas que passam pela zona de comutação uma f.e.m. dirigida contra o efeito (reação do induzido) das bobinas induzidas, quando elas são postas em curto-circuito pelas escovas, e atenua em grande parte a corrente de auto-indução.

VANTAGENS DOS PÓLOS DE COMUTAÇÃO

Como os interpolos são excitados pela corrente de linha, induzem uma força eletromotriz exatamente oposta à gerada pela reação do induzido para todos os valores de carga, mantendo uma comutação adequada com qualquer carga.

Não é preciso decalar as escovas, permitindo conservá-las em posição fixa (na posição que corresponde as zonas neutras) com qualquer carga, o que melhora bastante a característica do motor.

Elimina a ação desastrosa da faísca, etc.

EXCITAÇÃO DOS MOTORES DE C.C.

A velocidade de rotação de um motor de C.C. depende da intensidade do campo, do valor da tensão aplicada no induzido e da carga.

Os motores de C.C. podem ser excitados em paralelo, figs. 12 e 20; em série fig. 21, e compostos fig. 22, variando sua velocidade ou seu conjugado de acordo com a variação da carga que os mesmos suportam.

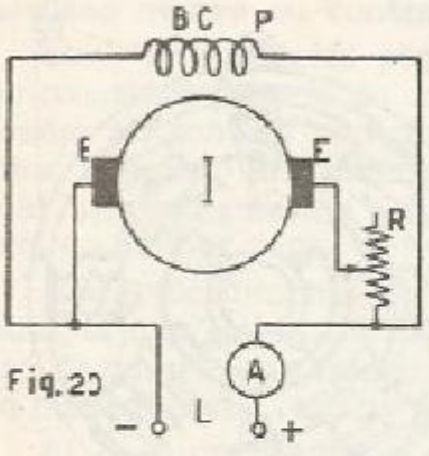


Fig.20

Fig. 20 — Motor paralelo. BC e P — bobina de campo e pólos. E — escovas. I — induzido. R — resistência de partida. A — amperímetro. L — linha de alimentação.

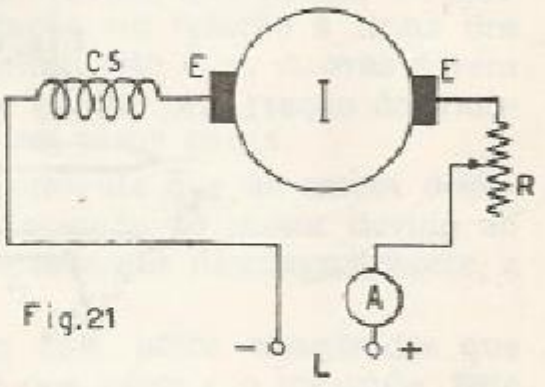


Fig.21

Fig. 21 — Motor série. CS — campo série. E — escovas. I — Induzido. R — resistência de partida. A — amperímetro. L — linha de entrada.

Capítulo 6

TIPOS DE MOTORES

MOTOR PARALELO, DERIVAÇAO OU SHUNT

O motor paralelo tem seu campo "BC" (bobinas de campo) ligado diretamente à linha de alimentação "L" em paralelo com o induzido, figs. 12 e 20. Em série com o induzido é ligada uma resistência "R" de partida a fim de limitar a corrente, até que a velocidade seja suficiente para gerar a f.c.e.m.

O conjugado de partida é inferior ao dos outros tipos de motores de C.C.

O motor paralelo é de velocidade constante, podendo-se também variá-la, proporcionando um controle da velocidade precisa em um amplo intervalo. A variação da carga do motor acarreta variação de intensidade de corrente no induzido, permanecendo praticamente constante a corrente do campo indutor. Uma vez ajustada a velocidade ela se conserva praticamente constante.

É aplicado em bombas, sistemas Ward-Leonard, máquinas de fiação, ventiladores, elevadores, esteiras transportadoras, ventoinhas, oficinas mecânicas e onde, de modo geral, seja necessário acionamento à velocidade constante (com conjugado constante), sendo muito usado também onde se precisa variar ou ajustar a velocidade.

MOTOR SÉRIE

No motor série, o conjugado varia com a carga porque as bobinas de excitação ou de campo "CS" estão ligadas em série com o induzido e a linha de alimentação "L", tal como se vê na fig. 21. As bobinas do campo indutor têm um número relativamente pequeno de fios de grande seção que lhe permite suportar toda a corrente que passa pelo induzido.

Como no caso anterior do motor paralelo, tem intercalada uma resistência "R" em série com o induzido, a fim de limitar a corrente de partida até obter a velocidade desejada. Os motores pequenos não têm esta resistência de partida.

A intensidade do campo varia com a corrente do induzido. O conjugado de partida é superior ao dos outros motores de C.C. A diminuição da velocidade com o aumento do conjugado resistente da máquina acionada, limita no motor série a potência absorvida da linha, conseguindo-se por outro lado um elevado torque na partida.

Os motores série encontram muitas aplicações em máquinas que requerem velocidades variáveis, muita força de arranque e rápida aceleração; são adequados para tração elétrica, guinchos elétricos, máquinas de alta rotação como politrizes e furadeiras manuais, barbeadores elétricos, pontes rolantes, etc.

O motor série tem grande força de arranque (por isto é empregado em bondes, ônibus e trens elétricos). É de velocidade variável e funciona com bom rendimento em qualquer rotação, mas suprimindo-se a carga, a velocidade aumenta perigosamente podendo disparar até arrebentar o induzido por efeito da força centrífuga, por isto são dificilmente empregados com transmissão por correia, porque se esta rompesse ou soltasse perderia a carga repentinamente. Nunca deve funcionar sob a condição sem carga.

O motor série quando projetado especialmente, pode trabalhar indistintamente com C.A. ou C.C. Este tipo de motor é o "motor universal"; seu rendimento é inferior ao dos motores série de C.C. ou C.A.; é um tipo monofásico usado em circuitos de 110 ou 220 volts

No motor série de C.A. a bobina de campo tem menos espiras do que no motor série de C.C. para diminuir a reatância do campo, permitindo a passagem da corrente necessária.

Quando um motor série é alimentado com C.A. a corrente no campo e no induzido é invertida simultaneamente em ambos, e o motor continua a girar na mesma direção tal como se fosse usado em C.C.

O motor universal normalmente é construído nas potências fracionárias, (abaixo de 1 cv) soe alcançar alta velocidade (aprox. 11 000 rpm) só limitada pelo efeito da força centrífuga no rotor. São usados em limpadores a vácuo, ventiladores, máquinas de costura, máquinas de furar, máquinas de escritório, ferramentas portáteis e, na maioria dos aparelhos eletrodomésticos que, desse modc, podem funcionar com os dois tipos de corrente.

A operação de um motor paralelo ligado a uma fonte de C.A é imprevisível.

MOTOR COMPOSTO, COMPOUND OU MISTO

O motor composto é uma combinação com características do motor série e paralelo, liga-se à linha como mostra esquematicamente a fig. 22, "R" é a resistência de partida.

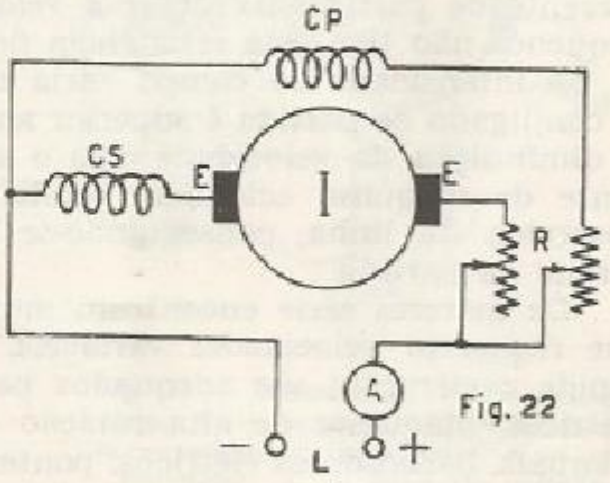


Fig. 22 — Motor composto, compound ou misto. CP — campo paralelo. CS — campo série. E — escovas. I — induzido. R — resistência de partida. A — amperímetro. L — linha de alimentação.

Fig. 22

O campo consiste de dois circuitos indutores, um em série "CS" e outro em paralelo "CP" com o induzido, fig. 22. O campo ligado em paralelo "CP" é bobinado com muitas espiras de fio de pequena seção. O campo série "CS" é enrolado com um número relativamente pequeno de espiras e o fio deve ter uma seção suficiente que permita suportar toda a corrente que passa pelo induzido.

O motor composto é usado sempre que se necessite de constância da velocidade e grande força de arranque. As características de velocidade com relação à carga podem ser modificadas ligando-se os dois bobinamentos para produzir campos no mesmo sentido, ou em sentidos contrários.

O motor cujo campo série se liga de modo a reforçar o bobinamento paralelo produzindo fluxos concordantes, diz-se que o motor é "composto cumulativamente". Nestes motores quando aumenta a carga produz considerável aumento de fluxo magnético, acarretando uma diminuição da velocidade e um grande aumento do conjugado.

O motor composto com fluxo adicional ou "aditivo" tem o conjugado de partida alto, possui parcialmente as características do motor série e parcialmente as características do motor paralelo. Tem a velocidade razoavelmente constante, bom rendimento com cargas pesadas e bom conjugado de partida.

É empregado onde se precisa de forte torção de arranque, diminuição da velocidade ou de aumentar a carga sem que possa alcançar o motor valores perigosos quando sem carga, etc.

No motor composto, quando se liga o enrolamento série em oposição ao bobinamento em paralelo, os fluxos produzidos são opostos e se diz que o motor é "composto com fluxo diferencial" ou "subtrativo". O aumento de carga produz um aumento de corrente e por conseguinte uma diminuição do fluxo útil do motor. A diminuição do fluxo permite que a velocidade aumente com o aumento de carga até um ponto seguro de funcionamento, porque ao diminuir o dito fluxo compensa o efeito do aumento da queda de tensão e a velocidade do motor mantém-se praticamente constante.

Os motores de excitação compostos de "fluxo diferencial" têm um conjugado de partida muito pequeno e são utilizados quando se deseja velocidade praticamente constante ao variar a carga. Este tipo de motor é pouco usado.

O motor composto mantém firme a velocidade da carga e não dispara em vazio. São empregados no acionamento de máquinas submetidas a bruscas variações de carga, como britadores de pedra, elevadores, tesouras, gruas, punções, laminadores, prensas, bombas de êmbolo, etc.

CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTORES DE C.C.

Os motores de C.C. são usados especialmente em todos os casos em que se precisa de uma velocidade ajustável e variável. Fabricam-se em potências que vão aproximadamente de 1/100 até milhares de cv.

Pode-se variar a velocidade de um motor de C.C. através de uma resistência variável ligada em série com o campo ou com o induzido.

A velocidade de rotação de um motor de C.C. depende da intensidade do campo e da tensão no induzido.

Aumentando a resistência do campo paralelo aumenta a velocidade. Aumentando a resistência do induzido diminui a velocidade, tendo o mesmo efeito que a redução de tensão fornecida ao motor.

No gerador de C.C. a tensão é controlada pela variação de uma resistência ligada às bobinas de campo. No motor de C.C. a resistência variável é ligada em série com o induzido para ser posto em marcha evitando a corrente excessiva na partida.

INVERSÃO DO SENTIDO DE ROTAÇÃO DO MOTOR DE C.C.

O sentido de rotação de um motor de C.C. depende da direção do campo e do sentido da corrente no induzido. Para inverter a rotação do motor trocam-se as ligações, ou só das bobinas de campo, ou só se invertem as ligações do induzido, mas não dos dois, porque mudam-se simultaneamente as polaridades e o motor continua a girar no mesmo sentido.

De preferência devem ser invertidas as ligações do induzido, deixando-se intactas as ligações das bobinas indutoras que geralmente incluem enrolamentos em série e em paralelo.

As figs. 113, 114 e 115 mostram distintos diagramas para a reversão do sentido de rotação de um motor de C.C.

Capítulo 7

BOBINAMENTO DE MOTORES PARA CORRENTE ALTERNADA

Divisão dos motores de C.A.

Os motores de corrente alternada (C.A.) dividem-se em duas classes principais: motores síncronos e motores assíncronos.

MOTOR SÍNCRONO

A característica básica do motor síncrono é a velocidade constante independente das variações de carga. Existe proporcionalidade constante entre a velocidade média de funcionamento e a freqüência de sua fôrça eletromotriz.

O motor síncrono utiliza um campo magnético giratório da mesma forma que o assíncrono. Seu estator (idêntico ao de um alternador e ao de um motor assíncrono) apresenta um bobinamento simetricamente distribuído, o qual, quando é ligado à fonte de alimentação produz um fluxo que gira em torno do entreferro a uma velocidade constante.

A diferença com o motor assíncrono é que no motor síncrono o rotor gira em sincronismo com o campo magnético do estator e, em funcionamento recebe energia elétrica de dois modos; o estator é alimentado pela rede de corrente alternada e, o rotor, recebe corrente contínua para excitação, excetuando-se os motores síncronos de pequena potência, como por exemplo os empregados em relógios elétricos, estroboscópios, registradores de consumo etc., que são construídos para trabalharem sem excitação a corrente contínua.

O rotor é construído com o mesmo número de pólos (tipo saliente) utilizados no estator. A força de rotação desenvolvida no estator não depende das correntes de indução do rotor, porque êste é transformado num eletroímã (deixando de ser uma bobina induzida) ao aplicar-se uma alimentação de corrente contínua a seus enrolamentos, produzindo assim outro campo magnético. Êstes dois campos magnéticos (um formado pela corrente alternada aplicada aos enrolamentos do estator, e outro, formado pela corrente contínua aplicada ao bobinamento do campo do rotor) reagem um sôbre o outro de tal forma que o rotor, sendo um eletroímã tem seus pólos atraídos por aqueles de polaridade oposta ao do estator. Como o campo magnético do estator é do tipo girante, os pólos do rotor acoplam-se aos do campo magnético giratório do estator fazendo com que os pólos do dito rotor sejam forçados a girar em sincronia com os pólos rotativos do estator.

A velocidade síncrona com que giram o campo magnético do estator e os pólos do rotor é diretamente proporcional à freqüência do sistema alimentador e inversamente proporcional ao número de pólos do bobinamento do estator.

A única possibilidade de se alterar a velocidade média de um motor síncrono quando em regime de funcionamento é pela variação de freqüência do sistema alimentador, já que os pólos do estator e do rotor são ligados firmemente por um elo magnético girando conjuntamente a mesma velocidade.

Partida do motor síncrono.

Por si mesmo, o motor síncrono não tem conjugado de partida. Para resolver o problema de partida há diversos procedimentos, o mais comum é o tipo de rotor com uma combinação dos rotores do alternador e do motor assíncrono, para isso, coloca-se no dito rotor um enrolamento tipo gaiola de esquilo, (disposto em ranhuras praticadas nas faces polares) semelhante aquêle de um motor assíncrono. O enrolamento em curto-circuito (gaiola de esquilo) serve também como amortecedor de mudanças de velocidades instantâneas resultantes de variações de carga e, por esta razão, é geralmente conhecido com o nome de enrolamento amortecedor. Se a resistência do bobinamento amortecedor fôr relativamente baixa, o conjugado de partida será reduzido.

O motor síncrono parte assim: Alimenta-se o estator (mantendo desalimentado o campo do rotor, ou seja, sem nenhuma corrente de excitação) como se fôra um motor de indução assíncrono ordinário. As correntes que se originam na gaiola de esquilo criam o conjugado que traz a velocidade quase a um valor próximo ao da velocidade síncrona (cêrca de 95% desta). Alimenta-se, então gradualmente com corrente contínua, as bobinas de excitação dos pólos do rotor, até que os pólos imantados, passem a girar sozinhos com a velocidade de sincronismo do campo magnético girante do estator.

Segundo a potência dos motores síncronos, quando inicialmente o estator é ligado à rêde de alimentação, é possível que devido ao grande número de espiras das bobinas de excitação (campo) se originem nestas por transformação eletromgnética tensões elevadas, principalmente quando o rotor se encontra parado ou quando sua velocidade é diferente da velocidade síncrona. Para se evitar êste inconveniente, é indispensável colocar o bobinamento de campo (excitação) em curto-circuito através de uma resistência durante a partida. Esta mesma resistência pode ser usada para descarregar o campo quando pára o motor.

Vantagens do motor síncrono.

O motor síncrono é o único motor elétrico que possui velocidade constante (ocorrendo uma variação de carga, haverá uma

variação instantânea da velocidade, durante alguns poucos ciclos, mas a velocidade permanecerá uniforme) tanto a vazio como com carga, desde que seja constante a freqüência de suprimento.

Pode ser empregado em duas condições diferentes:

a) Utilização combinada como motor e como refasador para melhorar o fator de potência de toda instalação a que está ligado;

b) Para velocidade síncrona com deslizamento igual a zero, independente tanto da carga como da tensão etc.

Desvantagens do motor síncrono.

Necessidade de usar corrente contínua para a sua excitação. Uma perturbação no sistema poderá fazer o motor sair de sincronismo e causar sua parada (enquanto que um motor assíncrono continuará girando). O controle e automatização de um motor síncrono não é tão simples como o de um motor assíncrono. Quando parado não poderá partir como motor síncrono, propriamente dito, pela aplicação direta da corrente alternada ao estator, porque não tem conjugado de partida para ser posto em marcha por seus próprio recursos, etc.

Aplicações mais comuns do motor síncrono.

O motor síncrono é empregado para numerosas aplicações industriais; é considerado um dos principais tipos de motores de corrente alternada.

É utilizado em todos os casos em que se precisa de uma velocidade invariável, como por exemplo, em relógios elétricos, aparelhos de registro de tempo, etc.

As aplicações típicas são: como gerador, corrigir o fator de potência, acionamento de grandes compressores, geradores de corrente contínua, laminadores, sopradores, convertedores de frequência, etc.

Na prática quase que não há diferença entre a construção de um gerador ou alternador e um motor síncrono, apenas algumas diferenças de detalhe que consistem na necessidade de assegurar a cada tipo as melhores características de funcionamento.

MOTOR ASSÍNCRONO OU DE INDUÇÃO

Motor de indução ou assíncrono (pode ser monofásico, bifásico ou trifásico, sendo o princípio de funcionamento o mesmo em todos os casos) é o que compreende dois circuitos elétricos em movimento relativo de rotação, um dos quais é ligado ao sistema de alimentação, sendo a energia transferida ao outro por indução eletromagnética, daí é derivado o nome de motor de indução.

No motor assíncrono seu rotor ou induzido não gira em sincronismo com o campo magnético do estator, e difere do motor síncrono por não ter o seu rotor ligado a qualquer fonte de alimenta-

ção como este. Não existe proporcionalidade constante entre a velocidade média de funcionamento e a freqüência de sua força eletromotriz.

Vantagens do motor assíncrono.

O motor de C.A. não tem comutador nem os problemas das escovas, porta-escovas, plano neutro, etc.

O motor assíncrono é relativamente simples, de: construção robusta; simplicidade de operação; adapta-se perfeitamente bem para aplicações de trabalho a velocidade constante (quando especificamente projetado sua velocidade pode ser variada dentro de certos limites); estabilidade operacional; facilidade de montagem, fácil manutenção e custo da mesma desprezível (existem apenas dois pontos de desgastes, os dois mancais).

O rotor é quase indestrutível. O estator é bastante simples, livre de centelhamento durante seu funcionamento, possibilidade de suportar grandes sobrecargas, etc.

O motor assíncrono pela sua confiança, versatilidade, fácil automatização e comando a distância, é usado para um sem número de finalidades. Adequadamente instalado e recebendo uma atenção conveniente, pode proporcionar por uma infinidade de anos uma continuidade de funcionamento livre de problemas.

Desvantagens do motor assíncrono.

A corrente necessária para a partida a plena tensão de um motor assíncrono (acima de 4 cv aproximadamente) provoca uma queda de tensão indesejável no sistema, às vezes superior à máxima admissível.

Necessidade de recorrer a métodos de partida com tensão reduzida, tendo porém o cuidado de verificar se a redução no conjugado de partida é suficiente para trazer a carga à velocidade nominal no tempo máximo de aceleração, etc.

Aplicações do motor assíncrono.

O campo de aplicação do motor assíncrono é ilimitado, é denominado o "burro de carga" ou o "cavalo de força" da indústria moderna.

Princípio de funcionamento do motor assíncrono.

O princípio de funcionamento dos motores assíncronos baseia-se no fato de que as correntes circulantes no enrolamento do estator induzem no bobinamento do rotor uma corrente alternada, e esta, por sua vez, produz um campo magnético que reagindo

com o campo giratório do estator cria um conjugado ou binário-motor, que tende a arrastar o rotor na direção da rotação do campo magnético giratório do estator.

Se no interior de um anel de aço "Ac" fig. 23, com os três enrolamentos montados colocamos um tambor de aço "Ta", as correntes que produzem o campo magnético girante atravessarão o tambor induzindo correntes nele. Estas últimas, por sua vez, produzem um campo magnético que combinado com o efeito do campo magnético rotativo desenvolve-se um binário-motor ou conjugado que fará girar o tambor no mesmo sentido do campo.

Nos motores de indução aproveita-se a propriedade da corrente alternada trifásica de criar um campo magnético rotativo.

Um campo magnético girante se cria não só pela corrente alternada trifásica, mas também por correntes polifásicas (de dois, quatro, seis fases). Também pode-se obter um campo rotativo por meio da corrente alternada monofásica, por exemplo: duas bobinas perpendiculares entre si, onde a defasagem de 90° elétricos entre ditas bobinas é obtida, artificialmente, por meio de uma impedância ou pelo uso de capacitor.

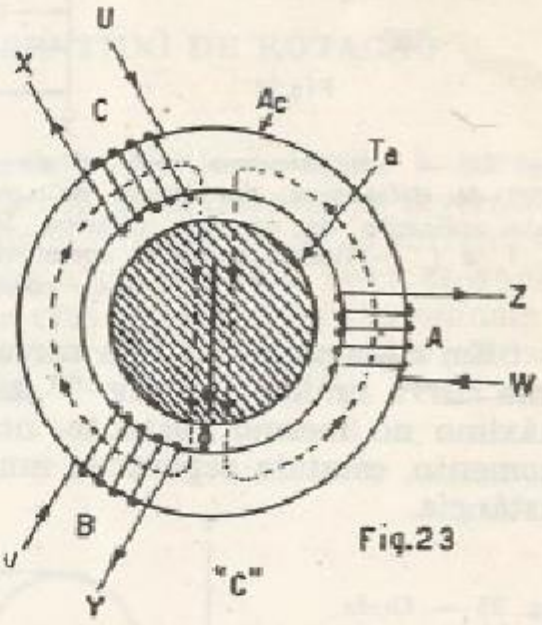


Fig.23

Fig. 23 — Método para se obter um campo magnético rotativo. Ac — anel de aço. Ta — tambor de aço. A, B e C — enrolamentos. U, V e W — princípio dos enrolamentos. X, Y e Z — finais dos enrolamentos. Φ — resultante do campo magnético.

CONSTRUÇÃO GRÁFICA DE CAMPOS ROTATIVOS TRIFÁSICOS

A notável particularidade da corrente trifásica (assim como de outras correntes polifásicas) consiste na propriedade de criar um campo magnético rotativo. Para isto, sobre um anel de aço colocam-se três enrolamentos idênticos, simetricamente dispostos, (fig. 23), A, B, e C, deslocados um do outro 120°. Os enrolamentos recebem energia de um sistema trifásico simétrico (ou seja três tensões de corrente alternada de igual freqüência e valor eficaz, porém defasadas 120°) e se produz um campo magnético rotativo

de intensidade constante. O campo magnético rotativo roda com velocidade uniforme, fazendo uma rotação em cada ciclo da corrente de alimentação.

Na fig. 24 estão ilustradas as correntes das três fases, representadas pelos vetores em "a" e pelas curvas senoidais em "b". Sôbre a linha horizontal X-X ou das abscissas marca-se o tempo "T" em frações de segundo, e na linha vertical Y-Y ou das ordenadas o valor da corrente em ampères.

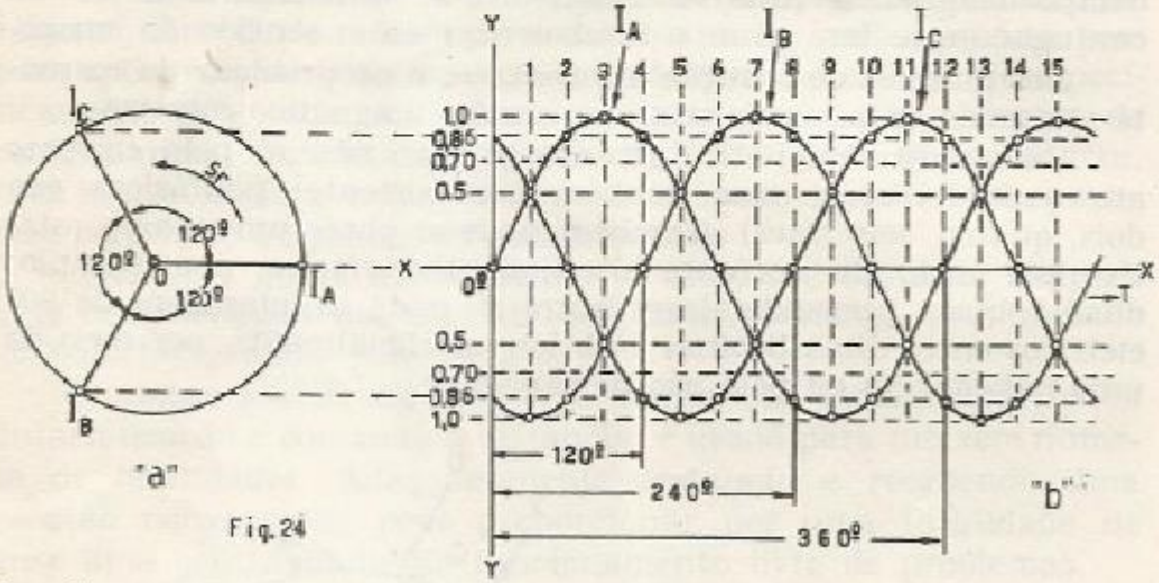


Fig. 24

Fig. 24 — «a» diagrama vectorial de seqüência de fase num sistema trifásico, 120º de defasagem. «b» curvas de um campo magnético rotativo desenvolvido pela aplicação da corrente trifásica. Sr — sentido de rotação. T — tempo. I_A, I_B e I_C — simbolizam-se as correntes com a mesma letra que suas respectivas fases correspondentes.

Em cada uma das três correntes o circuito trifásico descreve uma curva similar a da fig. 25, sendo que nunca chegam tôdas ao máximo no mesmo instante, nem passam por zero no mesmo momento, estando separadas umas das outras sempre da mesma distância.

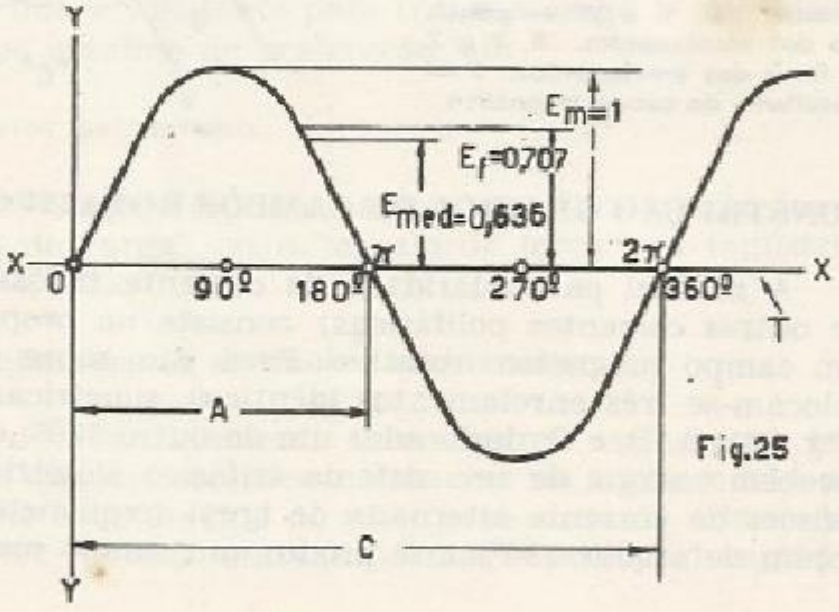


Fig.25

Fig. 25 — Onda senoidal ou curva de f.e.m. A — alternância. C — ciclo. X — eixo horizontal ou das abcissas. Y — eixo vertical ou das ordenadas. T — tempo. Em — tensão instantânea máxima. El — tensão eficaz. E_{med} valor médio da tensão.

Em cada instante, cada uma das correntes é igual em intensidade, porém de direção oposta as outras duas correntes.

Tomemos por exemplo o tempo correspondente à linha vertical 1, da fig. 24 "b". Neste instante as correntes I_A e I_C atingem a metade das suas maiores amplitudes positivas e, devem ser medidas por cima da linha horizontal X-X, o valor de cada uma é de 0,5, enquanto que a corrente na fase I_B se encontra no máximo de sua amplitude negativa, devendo medir-se por baixo da linha das abscissas (X-X) e seu valor é igual a — 1.

Na linha vertical 2 a corrente I_C é nula, as correntes I_A e I_B possuem sentidos contrários, $I_A = 0{,}866$, $I_B = -0{,}866$ e são de igual grandeza. Em 3, $I_A = 1$; $I_B = -0{,}5$; $I_C = -0{,}5$, e assim sucessivamente em instantes de tempos posteriores. A resultante do campo magnético está indicada pelo vetor Φ da fig. 23.

Examinando-se o diagrama, de acordo com as direções das correntes de cada fase e traçando o fluxo magnético resultante, vemos que o vetor Φ não muda em magnitude, porém sua posição no espaço é diferente, este gira. Desta forma, no interior do anel criar-se-á um campo magnético giratório.

METODO PARA INVERTER O SENTIDO DE ROTAÇÃO DO CAMPO GIRANTE

O sentido de rotação do campo girante é ligado à sucessão dos atrasos de fase das correntes nos enrolamentos. A inversão do sentido de rotação pode ser mudada invertendo-se as correntes de dois enrolamentos, variando assim a sucessão das fases. Nos motores, permutam-se as ligações de dois quaisquer dos terminais na caixa de ligações do motor, sendo este o método mais utilizado na prática para inverter o sentido da rotação.

Capítulo 8

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DOS MOTORES DE C.A.

Velocidade síncrona.

A velocidade síncrona de rotação dos motores de corrente trifásica geralmente dada em rotações por minuto (rpm), é o número de rotações do eixo do motor na unidade de tempo, sendo determinada pela freqüência da rede de alimentação e pelo número de pólos do motor. A velocidade (representa-se por "n") do campo magnético rotativo tem o nome de velocidade de sincronismo do motor; é independente do número de fases, da corrente e da tensão nos terminais de entrada. É expressa da seguinte forma:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} \qquad (9)$$

onde:

n = é a velocidade em rotações por minuto (rpm).

120 = constante, quando "p" é igual ao "número de pólos"

f = freqüência em Hertz (Hz).
(1 Hertz — símbolo Hz — freqüência de 1 ciclo por segundo).

p = número de pólos (geralmente se escreve "p" quando se dá o número de pólos e "P" quando se dá o número de pares de pólos) quando a constante é 120.

Exemplo: em um motor que tem 2 (dois) pares de pólos (4 pólos), a velocidade de sincronismo pode ser determinada dividindo-se o produto de 120 vezes a freqüência pelo número de pólos; isto é, se a rede tem 50 Hertz (Hz) a velocidade síncrona é igual a 6000 dividido por 4, ou seja, n = 50. 120/4 = 1500 rpm.

A velocidade preferível será de um número de rotações tão alto quanto permita um cálculo razoável, pois o motor será mais barato e mais favorável quanto à economia em serviço por suas melhores características elétricas. Os motores de baixas rotações ou elevado número de pólos possuem dados técnicos mais desfavoráveis, têm maiores dimensões e são mais caros que os de altas

rotações. O motor lento só deve ser adaptado em casos especiais ou quando o motor rápido implique em mecanismos redutores muito caros.

Como o motor só pode ter pólos em números pares (norte e sul), o maior número de rotações que um motor de 2 (dois) pólos ou 1 (um) par de pólos pode ter, depende da freqüência da rede em Hertz (Hz); em um sistema de 50 Hz é de 3.000 rpm. Quanto maior o número de pólos menor a rotação.

DESLIZAMENTO OU ESCORREGAMENTO

Escorregamento ou deslizamento é a diferença entre a velocidade síncrona do campo magnético girante do estador (n_1) e a velocidade de rotação do rotor (n_2). Pode ser expresso diretamente em: fração decimal da velocidade síncrona; em rotações por minuto ou em porcentagem da velocidade síncrona.

Quando o induzido ou rotor (cujos condutores formam circuitos fechados) é posto em um campo magnético girante produzido pelos enrolamentos do estator, induz-se uma corrente nos condutores do rotor. Esta corrente, por sua vez, produz seu campo magnético próprio que atua ou reage conjuntamente à ação do campo magnético girante, de tal forma que faz com que o rotor tome uma posição em que a corrente induzida é mínima e desenvolva um conjugado que tende a impulsionar o rotor no mesmo sentido (e próximo da velocidade síncrona) em que se move o campo do estator, conforme já foi explicado. A diferença de velocidade é suficiente para induzir no rotor uma corrente necessária para vencer as perdas elétricas e mecânicas. Se o rotor tivesse de acompanhar passo a passo a velocidade do campo girante, os condutores do rotor não seriam cortados por qualquer fluxo, não haveria corrente induzida neles e portanto nenhum esforço de rotação. Para que haja corrente induzida no rotor, é necessário que suas espiras cortem as linhas de força do campo, por isto precisa haver sempre uma diferença ou atraso de velocidade entre o rotor e o campo giratório. Esta diferença de velocidade tem o nome de deslizamento ou escorregamento das rotações do motor, geralmente é expresso como um valor unitário (ou uma porcentagem) da velocidade síncrona, segundo a seguinte fórmula:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \qquad (10)$$

onde

S = escorregamento ou deslizamento.
n_1 = velocidade síncrona.
n_2 = velocidade do rotor.

Deslizamento em percentagem.

O deslizamento varia ligeiramente com as variações de carga, quanto menor for o deslizamento mais próximas estarão as velocidades do rotor e do campo magnético girante, porém, o rotor nunca adquire a velocidade síncrona. Quanto maior for o entreferro maior será o escorregamento. A f.e.m. e a reatância do rotor são proporcionais ao deslizamento.

A diferença de rotações entre o rotor e o campo, dada em percentagem, expressa-se pela equação:

$$S = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) . 100 \qquad (11)$$

No momento da partida do motor, quando a velocidade do rotor $n_2 = 0$, o escorregamento será:

$$S = \frac{n_1}{n_2} = 1, \text{ ou } 100\%$$

onde

$$n_2 = n_1 (1 - S)$$

Exemplo: se em um motor de 4 pólos e 50 Hz, o rotor gira a 1470 rpm e a velocidade síncrona é 1500 rpm, a diferença em velocidade é de 30 rpm. O escorregamento "S" é então igual a:

$$S = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0{,}02$$

e em percentagem:

$$S = \left(\frac{1500 - 1470}{1500} \right) . 100 = 2\%$$

FREQÜÊNCIA DO ROTOR

A freqüência da corrente no rotor "f_2" é igual ao produto da freqüência no estator "f_1" pelo deslizamento de fase "S".

$$f_2 = f_1 . S \qquad (12)$$

Exemplo: determinar a freqüência da corrente do rotor de um motor de indução de 4 pólos (2 pares), 50 Hertz e escorregamento de fase 0,02.

$$f_2 = 50 . 0{,}02 = 1 \text{ Hz}$$

O deslizamento de fase dos motores assincronos no regime de plena carga varia segundo a potência do motor. Para motores de potência reduzida, o escorregamento é de 3 a 6% aproximadamente e, de 1 a 3% para motores de grande potência.

Sob o ponto de vista do rendimento do motor, convém que o deslizamento seja o menor possível, se considerarmos que as perdas do rotor são iguais ao produto do deslizamento pela potência absorvida pelo rotor.

ESCALA DE GRADUAÇAO DA POTÊNCIA DOS MOTORES DE C.A.

Para a fabricação de motores em séries padronizadas é norma classificar os motores em pequena, média e grande potência.

Motor de pequena potência é aquele cuja potência em cv multiplicada pelo número de pólos fornece um resultado inferior a 4.

Motor de média potência é aquele cuja potência em cv multiplicada pelo número de pólos dá um resultados compreendido entre os limites de 4 e 400.

Motor de grande potência é aquele cuja potência em cv multiplicada pelo número de pólos fornece um resultado superior a 400.

CONSTRUÇAO MECANICA DE UM MOTOR DE INDUÇAO

As figs. 26 e 27 mostram os componentes de um motor assincrono. Embora se fabriquem uma grande variedade de motores, podem caracterizar-se estruturalmente por quatro partes básicas: estator, rotor, tampas laterais e mancais. Consistindo em geral, de uma parte ativa e de uma parte não ativa.

Gentileza Westinghouse

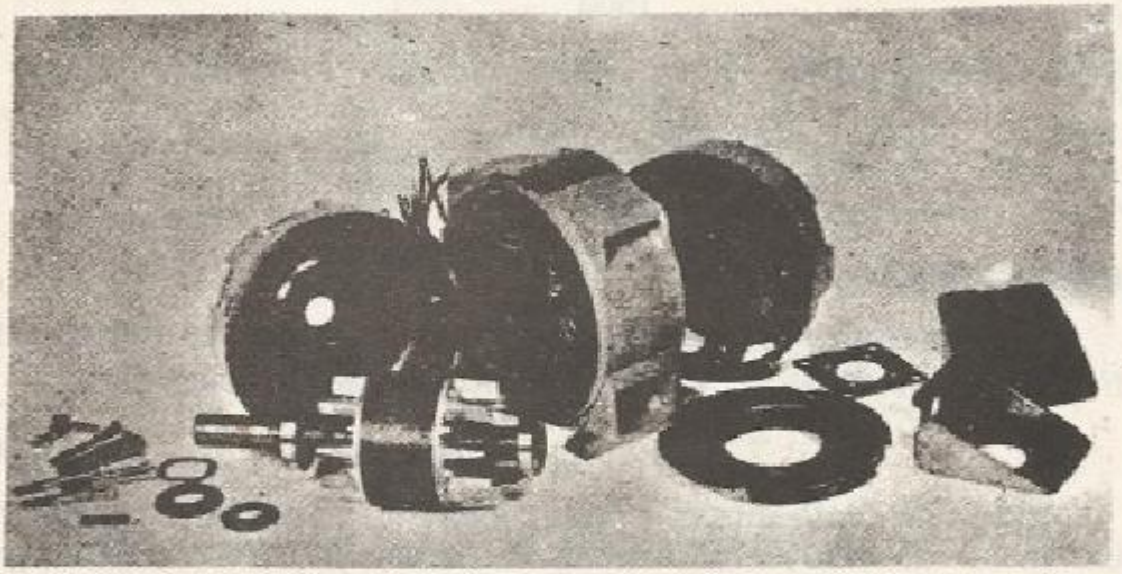


Fig. 26 — Motor assíncrono desmontado.

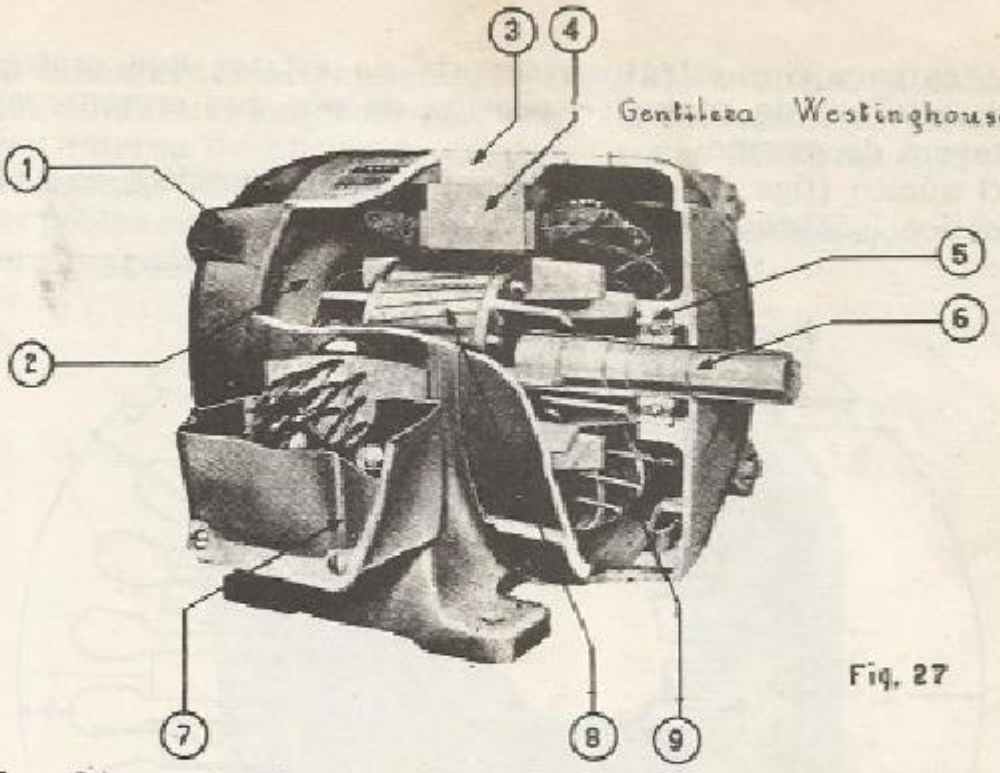


Fig. 27 — Componentes do motor: 1 — tampa, 2 — defletor de ar, 3 — estrutura, 4 — lâminas do estator, 5 — mancal, 6 — eixo, 7 — caixa de terminais, 8 — rotor, 9 — enrolamento do estator.

A parte ativa é formada por: Chapas moldadas em aço magnético isoladas entre si, formando um conjunto ou "pacote" para o estator e um para o rotor; o enrolamento do estator e do rotor, onde a energia elétrica é convertida em energia mecânica.

A parte não ativa são todos os outros componentes como tampas, carcaça, eixo, mancais, etc., que servem para transmitir o conjugado, proteção contra influência externa e fixação do motor.

Estator

Estator ou indutor (fig. 28) é a parte estacionária do motor, consiste de três partes: carcaça, núcleo e bobinamentos.

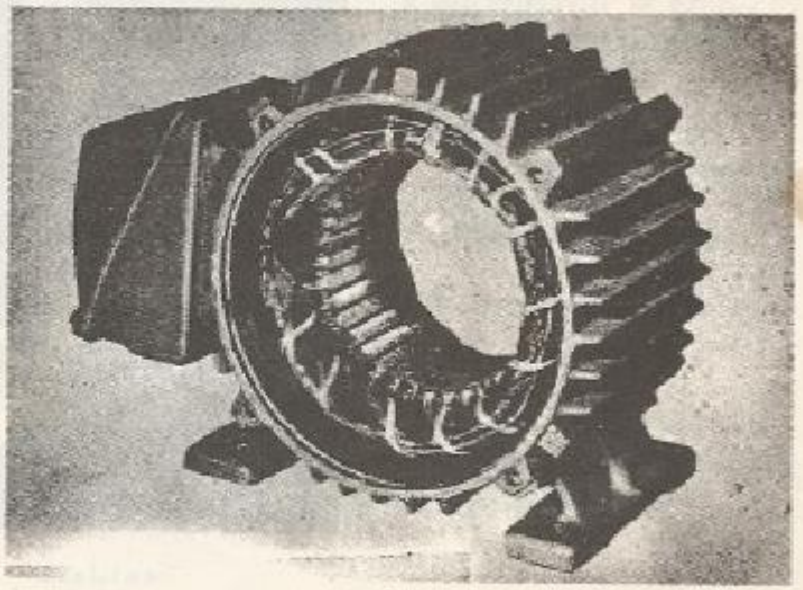


Fig. 28 — Estator de um motor de indução com seu enrolamento montado.

A carcaça é a estrutura suporte do estator que protege as partes internas do motor, é provida de pés que servem para a montagem do mesmo.

O núcleo (figs. 29 e 30) é a parte ferromagnética do circuito magnético localizado no estator.

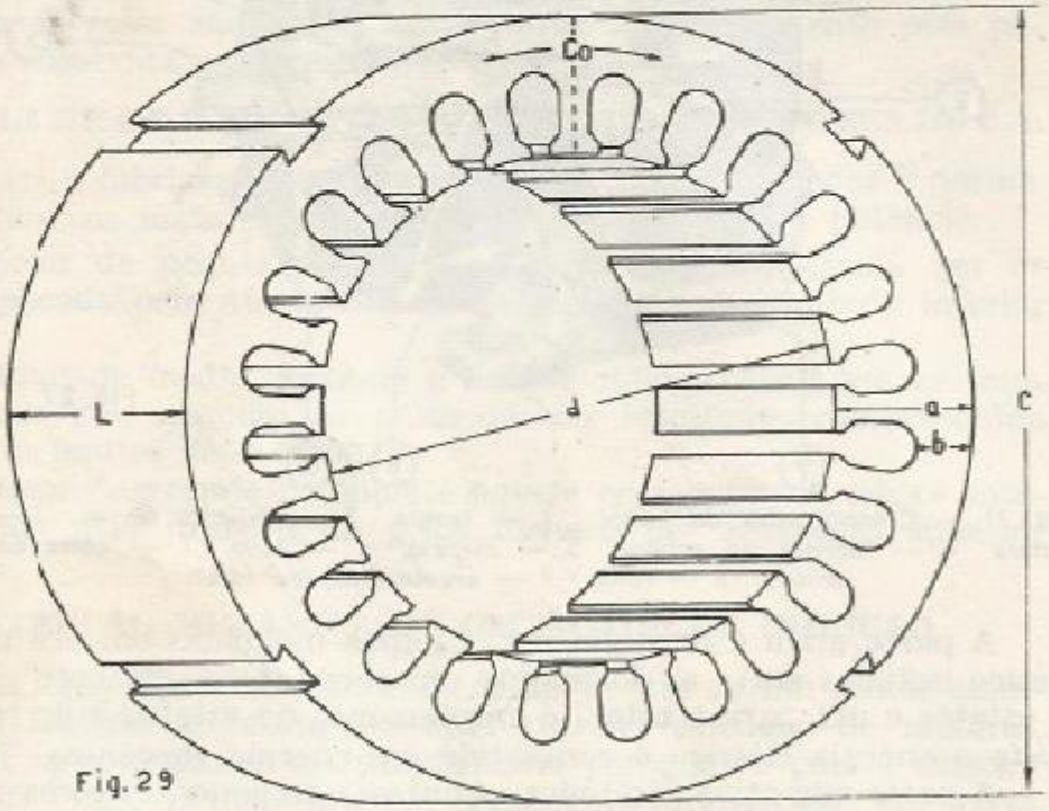


Fig. 29

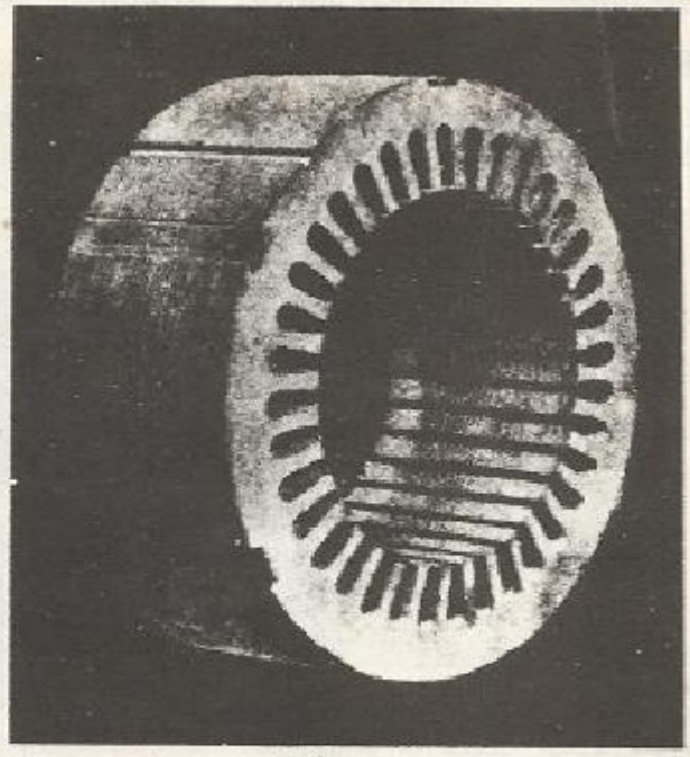


Fig. 29 e 30 — Núcleos do estator de um motor de C.A.

Gentileza Westinghouse

O bobinamento ou enrolamento (fig. 31) consiste em bobinas (de fios condutores isolados) colocadas em ranhuras em torno da periferia interna do núcleo do estator, ligadas de forma que suas forças eletromotrizes se somem.

Os bobinamentos e o núcleo formam o eletroimã que produz o campo magnético dentro do qual o rotor gira.

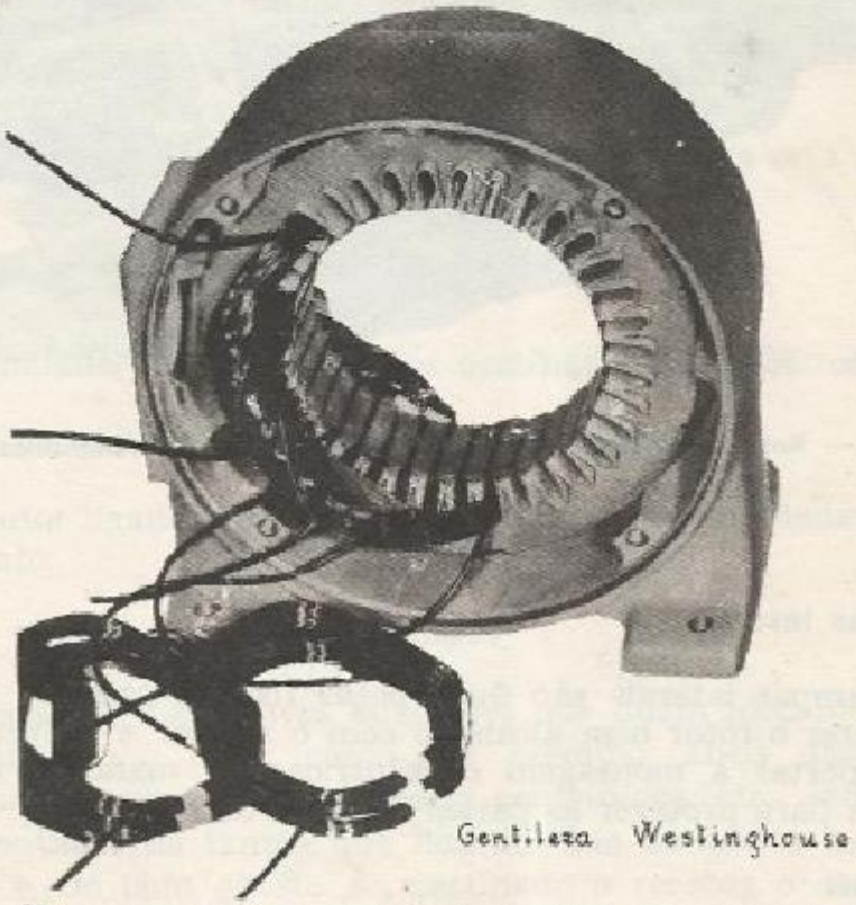


Fig. 31 — Montagem de bobinas no estator de um motor de C.A.

Rotor

O rotor ou induzido (fig. 32) é o elemento girante do motor; consiste de três partes principais: núcleo, bobinamento e eixo.

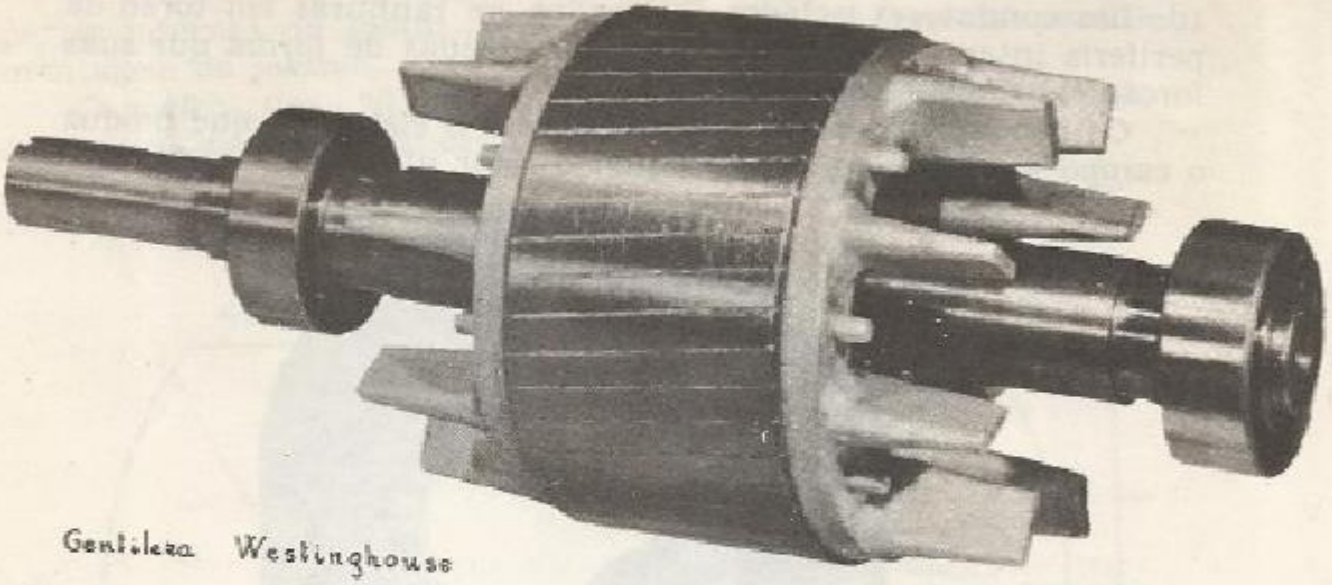
O núcleo é a parte ferromagnética do circuito magnético localizada no rotor.

O bobinamento é introduzido em ranhuras longitudinais em torno da circunferência do núcleo.

Eixo é a parte onde se monta o conjunto formado pelo núcleo e o enrolamento, sendo o rotor posto a girar pelo campo magnético formado pelas bobinas do estator.

De acordo com o sistema de construção do rotor, os motores trifásicos assíncronos subdividem-se em: motores com rotor em curto-circuito e motores de rotor bobinado.

Como já foi dito, o rotor do motor síncrono é suprido diretamente por uma fonte de energia, e no motor assíncrono o rotor é isolado, sendo uma unidade auto-suficiente que não precisa de conexões externas.



Gentileza Westinghouse

Fig. 31 — Rotor tipo gaiola de esquilo, inclusive eixo e rolamentos.

Tampas laterais

Tampas laterais são duas peças fixas à carcaça, destinadas a manter o rotor bem alinhado com o estator e prover um meio de suportar a montagem concêntrica dos mancais. As tampas servem para proteger as partes internas do motor.

Mancais

Os mancais suportam o eixo e são colocados em cada extremidade do mesmo para permitir que o dito eixo gire silencioso, seguro, suavemente e com um mínimo de desgaste e atrito.

Os mancais devem ser cuidadosamente projetados para assegurar uma manutenção reduzida e uma vida longa na execução da tarefa pretendida.

Ranhura

Ranhura é cada uma das reentrâncias no núcleo, onde são colocados os enrolamentos.

As ranhuras são regularmente espaçadas todas do mesmo ângulo e devem ser idênticas.

Dente

Dente é a parte do núcleo compreendida entre duas ranhuras adjacentes.

Entreferro

Entreferro é a descontinuidade na parte ferromagnética de um circuito magnético, geralmente curta em comparação com o comprimento do restante do circuito, quando medida ao longo das linhas de forças, ou dito de outra forma, entreferro é o espaço de ar que as linhas magnéticas devem atravessar. Este espaço de ar deverá ser estreito para reduzir ao mínimo a relutância magnética.

Usando-se o menor entreferro possível aumenta-se a intensidade do campo magnético.

Pontas de bobinamento

Extremidades de enrolamentos destinadas à ligação destes.

Derivação de um bobinamento

Condutor ligado a ponto situado entre as extremidades de um enrolamento.

Lugar de fixação das peças auxiliares

As peças ou dispositivos auxiliares que unem mecanicamente as tampas com o rotor, como por exemplo: anéis deslizantes, escovas, porta escovas, interruptores centrífugos, etc., vêm geralmente montados na tampa que fica do lado da ponta menor do eixo, isto é, do lado oposto ao destinado a receber o dispositivo de acoplamento.

Caixa de terminais

O painel ou a base de terminais onde se permite fazer as ligações da linha, alteração da tensão e sentido de rotação é o que se chama caixa de ligação ou caixa de terminais do motor.

No sistema americano, olhando o motor desde a face da caixa de ligação, o lado da ponta maior do eixo fica no lado direito do observador.

No sistema europeu o critério adotado é o contrário; a parte maior do eixo fica no lado esquerdo da face da caixa de terminais.

Geralmente, o lugar do motor onde são feitas as ligações fica do lado da ponta mais curta do eixo.

Frente de um motor

Frente de um motor é a extremidade na face oposta ao prolongamento do eixo.

Sentido de rotação

O sentido de rotação, isto é "no sentido dos ponteiros do relógio" ou "contrário aos ponteiros do relógio" é sempre considerado com o observador voltado para a frente do motor nos motores de tipo americano.

Nos motores de tipo europeu a rotação entende-se olhando da ponta do eixo para o motor. O motor gira normalmente para a direita (sentido dos ponteiros do relógio).

CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DO MOTOR ELÉTRICO

As características principais de um motor elétrico são: potência, rendimento, velocidade, tensão, corrente, freqüência, fator de potência e fator de serviço.

Potência

Potência nominal é a que o motor pode fornecer no eixo, dentro de sua característica nominal, em regime especificado.

A expressão de potência (trifásica) é a seguinte:

$$P = 1{,}732 \; V \cdot I \cdot \cos\varphi \qquad (13)$$

$$P_1 = P \cdot \eta \qquad (14)$$

sendo:

P_1 — potência elétrica total absorvida da rede pelo motor.

P — potência nominal que o motor pode fornecer no eixo.

η — eta, letra minúscula do alfabeto grego que expressa o rendimento do motor.

V — volts.

I — intensidade da corrente em ampères.

$\cos\varphi$ — fator de potência.

Equivalência de unidades

1 cv = 736 watts 1 HP = 746 watts 1 kW = 1,36 cv
1 cv = 0,987 HP 1 HP = 1,013 cv 1 kW = 1,34 HP

cv = cavalo-vapor.
HP = horse power.
kW = quilowatt.

Rendimento

Rendimento é a relação, expressa em percentagem, entre a potência produzida ou fornecida por um motor e a potência da linha por ele absorvida, ou seja, é a perda de energia útil na etapa de transformação da energia elétrica em energia mecânica, segundo a seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{736 \cdot cv}{1{,}73 \cdot V.I. \cdot \cos\varphi} \cdot 100 \qquad (15)$$

onde:

η — eta, letra minúscula do alfabeto grego que expressa o rendimento do motor em percentagem.
cv — potência em cavalos-vapor.
I — corrente em ampéres.
V — volts.
$\cos\varphi$ — fator de potência.

Normalmente o rendimento aumenta com o tamanho do motor. A seguir damos como valores aproximados os seguintes:

Potência	Rendimento
1 cv	0,75
5 cv	0,85
15 cv	0,87
50 cv	0,89
100 cv	0,90
1000 cv	0,95

O rendimento ótimo não é sempre decisivo para o dimensionamento do motor. Em certos casos são mais importantes o conjugado de partida, a marcha silenciosa e outras exigências.

O rendimento varia com a carga, à medida que ela aumenta melhoram o fator de potência e o rendimento do motor.

Velocidade

A velocidade é dada geralmente em rpm (rotações por minuto), é o número de rotações do eixo do motor na unidade de tempo. Tal valor depende das características construtivas do motor, número de pólos do estator e da freqüência da rede em Hz (Hertz).

Tensão

Tensão é a "voltagem" para a qual foram fabricados os enrolamentos do motor. A tensão de suprimento do motor é determinada em acordo com os aspectos econômicos e com a tensão da rede onde vai ser ligado.

Corrente

É a corrente nominal que o motor demanda ou solicita da rede para com a tensão e freqüência nominais, dar em seu eixo a rotação especificada e a potência nominal em cv.

A corrente é uma função da potência e varia inversamente com a tensão; para uma mesma potência, quanto maior a tensão, menor a corrente solicitada.

Freqüência

É a freqüência nominal da linha de alimentação de corrente alternada para a qual o motor foi projetado. Geralmente os motores são fabricados para trabalhar em redes com 50 ou 60 Hz, alterando neste caso sua rotação.

Fator de potência

Fator de potência é a relação entre a potência útil (ativa) e a potência total absorvida pelo motor (aparente), equivale também ao co-seno do ângulo entre os vetores dessas potências.

O fator de potência varia com a carga. Dentro dos limites práticos ele melhora com a carga.

Fator de serviço

O fator de serviço (FS), que alguns fabricantes incorporam no projeto de seus motores, é o multiplicador percentual que aplicado à potência nominal indica a capacidade de sobrecarga permissível que pode ser aplicada continuamente sob condições especificadas, sem que a elevação de temperatura exceda de 50°°C. Em geral este fator é de 15%.

Ou em outras palavras, FS (fator de serviço) significa que o motor pode dar mais potência que a especificada na placa de identificação, para uma mesma freqüência, por exemplo:

Um motor de 10 cv, 60 Hz, com um fator de serviço (FS) 1,15, pode ser usado com uma sobrecarga até 15% em 60 Hz, isto é, 11,5 cv sem aquecimento prejudicial, embora com prejuízo do fator de potência e portanto do rendimento.

A finalidade principal do FS (fator de serviço) é permitir flexibilidade de funcionamento em regimes de sobrecargas. É importante lembrar que o valor obtido pela aplicação do fator de serviço (FS) é válido somente se são mantidos os fatores usuais de serviço, a tensão e a freqüência previstas.

Capítulo 9

MÉTODOS DE ENROLAMENTO

Bobinamento do estator

Vimos anteriormente que a velocidade de rotação de um motor de C.A. depende da freqüência da corrente e do número de pólos criados pelo enrolamento do indutor.

A maneira mais conveniente de associar os vários condutores de um enrolamento é distribui-los em bobinas, e a distribuição das bobinas deve ser feita de tal modo que formem grupos. As bobinas de cada grupo são ligadas entre si, apresentando cada grupo um princípio e um fim, e colocadas uniformemente nas ranhuras do núcleo do estator para criar o campo magnético.

Exemplifica-se o tipo mais comum do enrolamento que é o trifásico.

Um campo magnético no estator de um motor de indução polifásico obtém-se dispondo-se de um bobinamento trifásico, ou seja, três circuitos idênticos eletricamente independentes uns dos outros, isto é, um enrolamento separado para cada fase da rede de alimentação. Cada fase (ou enrolamento) tem um número determinado de bobinas, que se colocam e ligam de forma tal que resulte um sistema de bobinas deslocadas umas em relação às outras de um ângulo de 120 graus elétricos.

Ao serem alimentados os três enrolamentos por um sistema trifásico simétrico de correntes, cada bobina do estator considerada isoladamente atua como o enrolamento primário de um transformador, produzindo um campo magnético alternado de direção fixa. A composição de todos os fluxos parciais dá origem a um giratório de magnitude constante, de tantos pares de pólos quantos grupos de três bobinas tenha o estator, e este fluxo rotativo produzido de valor constante dependerá do dito número de pólos. As bobinas, como já foi dito, colocam-se dentro das ranhuras do estator, fig. 31, e devem ser ligadas de modo que suas forças eletromotrizes se somem.

DISPOSIÇÃO DAS RANHURAS

O numero de ranhuras por pólo e por fase no rotor é diferente do estator, de preferência primos entre si, porque se fossem iguais, ao coincidir em repouso as ranhuras do rotor com a posição das ranhuras do estator haveria um ponto de mínima relutância e na partida não se poderia pôr em marcha o motor, limitando-se a funcionar como transformador.

Freqüentemente são empregados no rotor dos motores de indução ranhuras inclinadas com relação a seu eixo geométrico, fig. 32, porque com este arranjo melhora-se o problema da relu-

tância, obtém-se forças eletromotrizes induzidas que se aproximam mais da forma senoidal, reduz alguns harmônicos e ruídos de indução magnética, etc.

O formato das ranhuras (canais, canaletas) varia bastante nas diversas aplicações dos motores, dependendo de seu tamanho, tensão e potência, porque desta maneira se adapta a característica de funcionamento ao serviço a que se destina. Também influi na escolha que as ranhuras sejam do estator ou do rotor.

As ranhuras dos motores podem ser de um modo geral divididas em duas classes: ranhuras abertas e ranhuras semifechadas. Nos motores de grande potência usam-se ranhuras abertas porque oferecem a vantagem precipua de permitir a instalação de bobinas pré-fabricadas (e de fios de seção retangular) e previamente isoladas, antes de introduzidas nas ranhuras.

As ranhuras semicerradas empregam-se quase em todos os motores de indução porque a maior área efetiva da face dos dentes reduz a intensidade da corrente magnetizante e a relutância do entreferro, apresentando uma eficiência maior e um fator de potência melhor, reduz os binários motores de partida e parada, além de que ganham termicamente uma certa reserva na potência, podendo ser carregado mais, o que permite usar modelos menores. Nos tipos de ranhuras semifechada, cada condutor deve ser colocado separadamente no seu lugar, um, dois ou vários de cada vez, o que é mais demorado e mais difícil a aplicação do isolamento

Normalmente em ambos os tipos de ranhuras, as bobinas (condutores) são mantidas em sua posição por meio de cunhas de madeira dura ou de fibra.

TIPOS DE ENROLAMENTOS

Os bobinamentos das máquinas de corrente alternada classificam-se em dois tipos gerais chamados de: enrolamento em espiral e bobinamento imbricado.

Enrolamento em espiral.

Enrolamento em espiral ou espiralado (figs. 33 e 34) é aquele no qual as bobinas de cada grupo ligam-se de modo a formar um bobinamento em espiral. Não obstante as bobinas terem um passo menor que 180º elétricos, o enrolamento não é considerado como possuindo as propriedades peculiares aos bobinamentos de passo fracionário. Este tipo de enrolamento é pouco usado.

Bobinamento imbricado.

Bobinamento imbricado, também conhecido com os nomes de diamante ou coroa, é no qual se usam bobinas em tipo de losango, fig. 35. Este tipo é o que se adota quase exclusivamente e se subdivide em duas classes: enrolamento imbricado a passo pleno e bobinamento imbricado a passo fracionário.

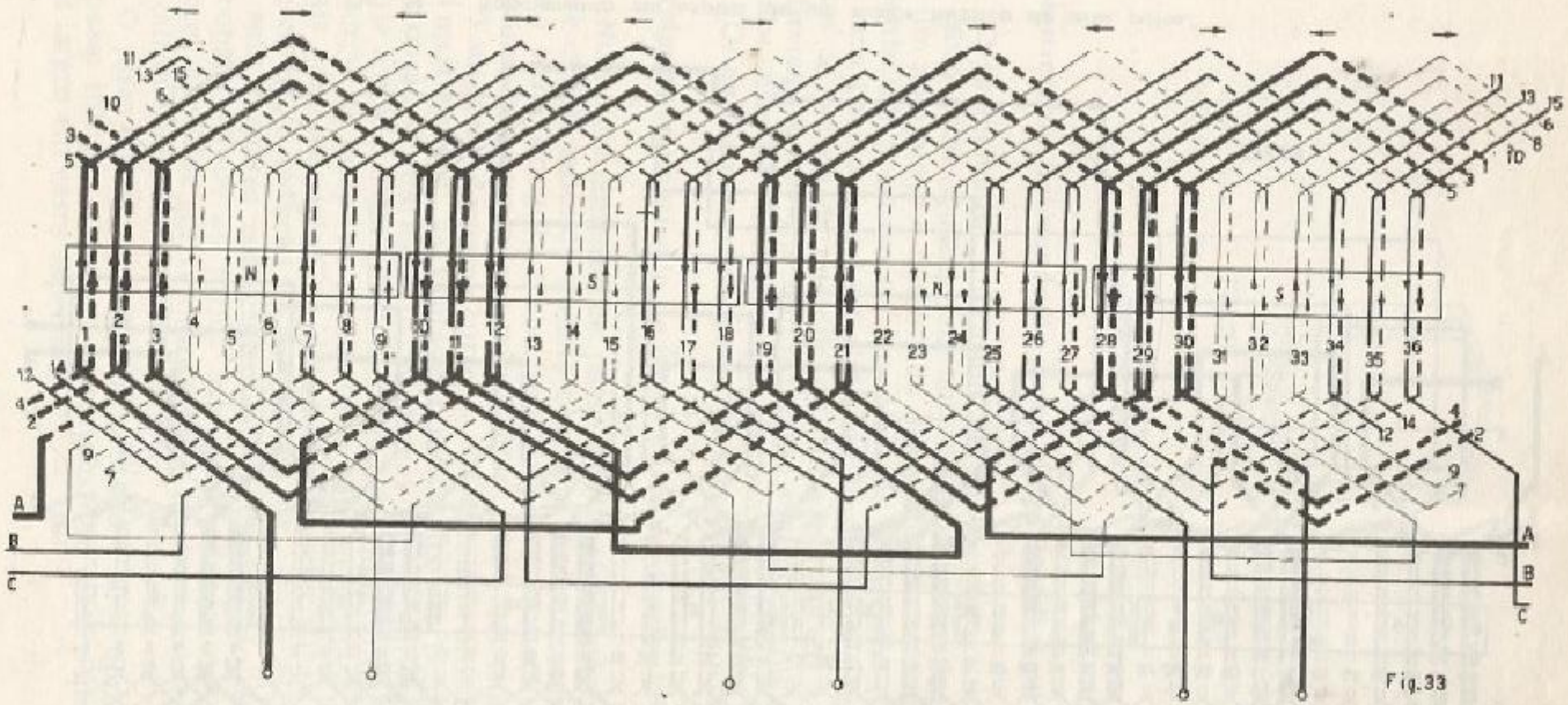


Fig.33

Fig. 33 — Enrolamento onde as bobinas de cada grupo se ligam de modo a formar um bobinamento em espiral.

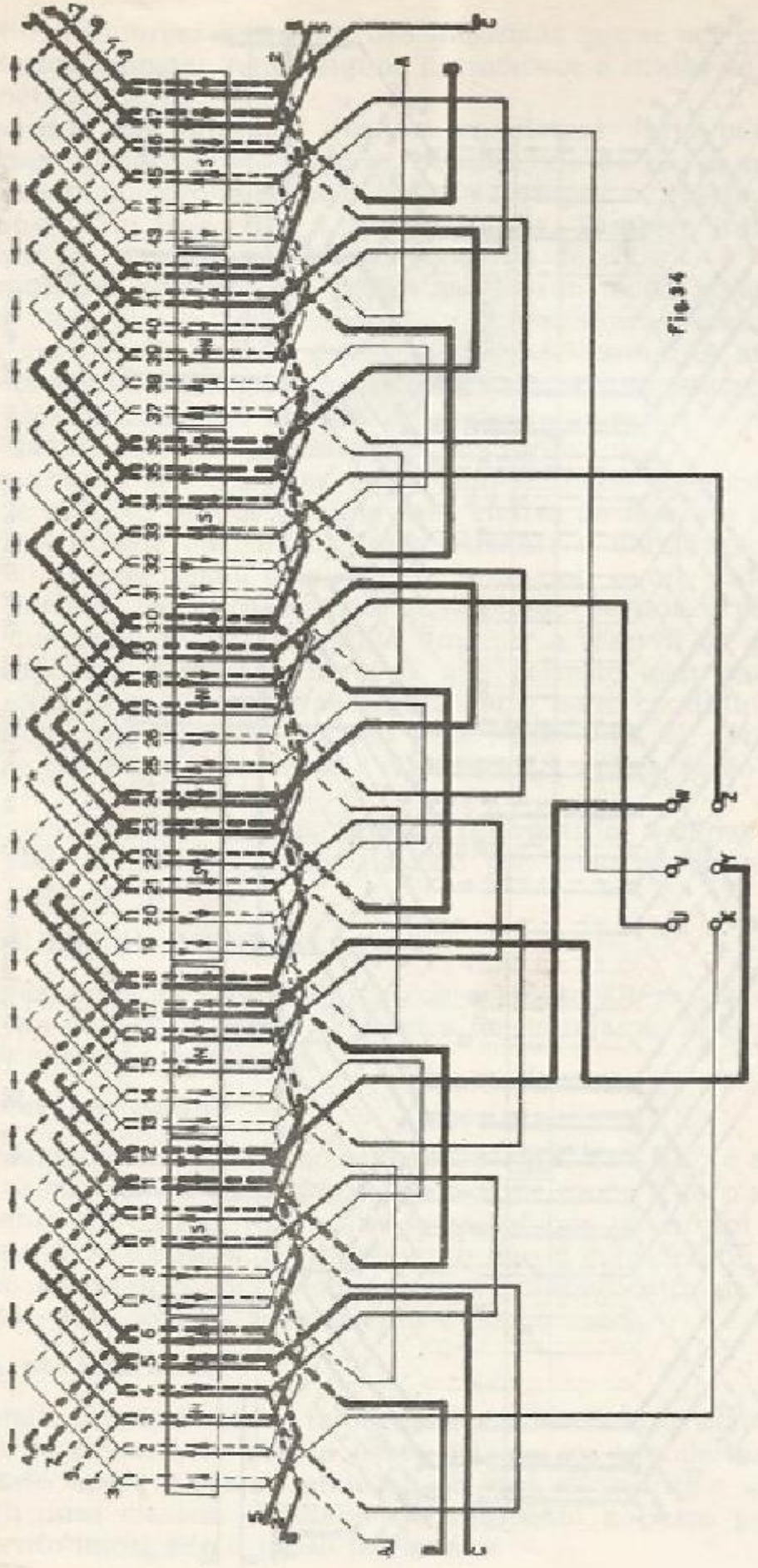


Fig. 34 — Bobinamento em espiral de um motor trifásico de oito pólos.

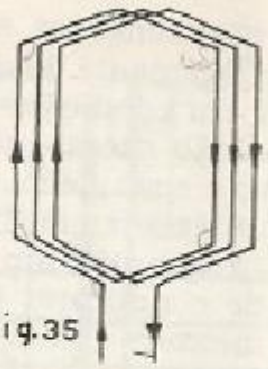


Fig. 35 — Bobina em forma de losango ou diamante.

Bobinamento imbricado de passo pleno, integral ou longo.

O enrolamento imbricado de passo longo (integral) é igual ao passo polar. Quando um lado de uma bobina está sob o centro de um pólo norte o outro lado dessa bobina está em posição equivalente sob o centro de um pólo sul adjacente. O passo ou vão de cada bobina é de 180º elétricos. Neste tipo de bobinamento, os lados de bobina de qualquer ranhura pertencem à mesma fase e a direção da corrente tem o mesmo sentido, o que já não acontece nos casos de enrolamentos com passo fracionário.

Os enrolamentos de passo pleno (longo) são pouco usados.

Enrolamento imbricado de passo curto ou fracionário.

Num bobinamento de passo curto (fracionário) a distância entre os dois lados da mesma bobina é menor (ou maior) que um passo pleno (longo). A abertura ou passo da bobina contada em ranhuras é menor que o passo polar (180º elétricos).

Vantagens do passo curto. — Os enrolamentos de passo curto são mais usados; as vantagens deste tipo de bobinamento são: a) redução de harmônicos; b) forças eletromotrizes quase exatamente senoidais, daí que com o passo fracionário há uma melhoria na forma da onda; c) possibilita empregar núcleos de armaduras iguais para máquinas de diferentes características; d) economia de material e redução da indutância da cabeça de bobina devido aos seus menores comprimentos; e) diminuição da impedância da bobina porque há menor efeito de indução mútua entre condutores contidos em ranhuras onde também existem condutores das outras fases, etc.

O passo curto (fracionario) adotado é 80% aproximadamente do passo integral (longo), empregando-se passos mais curtos ou mais largos em casos especiais.

Desvantagens do passo curto.

As desvantagens destes enrolamentos são:

a) A f.e.m. requerida é levemente maior que a dos bobinamentos a passo pleno (longo) em condições idênticas, pois os dois lados de uma mesma bobina não caem, num dado instante, em posição simétrica sob os pólos, e suas f.e.m. são, assim, um pouco menores do que se estivessem afastadas de 180° E;

b) Para a mesma f.e.m. requerida, um bobinamento de passo curto precisa maior número de condutores por fase que um enrolamento a passo pleno nas mesmas condições, pela razão acima exposta, etc.

A f.e.m. de uma bobina ou de um enrolamento de passo curto obtém-se: multiplicando o "fator de passo" pela f.e.m. da bobina ou do enrolamento de passo pleno.

DISPOSIÇÃO DAS BOBINAS

De acordo com a disposição das bobinas, a classificação mais racional é pelo número de elementos (lados de bobina) por ranhura.

Os enrolamentos se subdividem em duas classes: bobinamentos de uma camada e enrolamentos de duas camadas.

Ambos tipos de bobinamento podem ser dispostos em uma ou mais ranhuras por pólo e por fase, e podem ser realizados por bobinas constituídas por várias espiras ou com bobinas formadas por uma única espira (barra de cobre).

O enrolamento imbricado de dupla camada é o de maior emprego porque permite usar: a) circuitos paralelos nos motores com grande corrente de fase, possibilitando assim a um mesmo motor poder trabalhar em tensões diferentes com uma simples mudança de ligações externas; b) enrolamentos com passo fracionário, etc.

Enrolamentos de uma camada.

O enrolamento de uma camada possui um único lado de bobina em cada ranhura. O número de ranhuras ocupadas deve ser par e o número das bobinas é igual à metade do número de ranhuras do estator, fig. 36. Cada bobina ocupa duas ranhuras inteiras do estator. As figs. 37 e 38 mostram a disposição deste tipo de bobinado, onde o estator é composto por 36 ranhuras e tem 18 bobinas. Este tipo de enrolamento é conhecido com os nomes de meia bobina, meio imbricado, meio diamante e meia coroa.

As bobinas podem ser enroladas diretamente no estator, ou separadamente sobre formas apropriadas, para serem colocadas depois nas respectivas ranhuras.

Todos os condutores situados em uma ranhura fazem parte da mesma bobina.

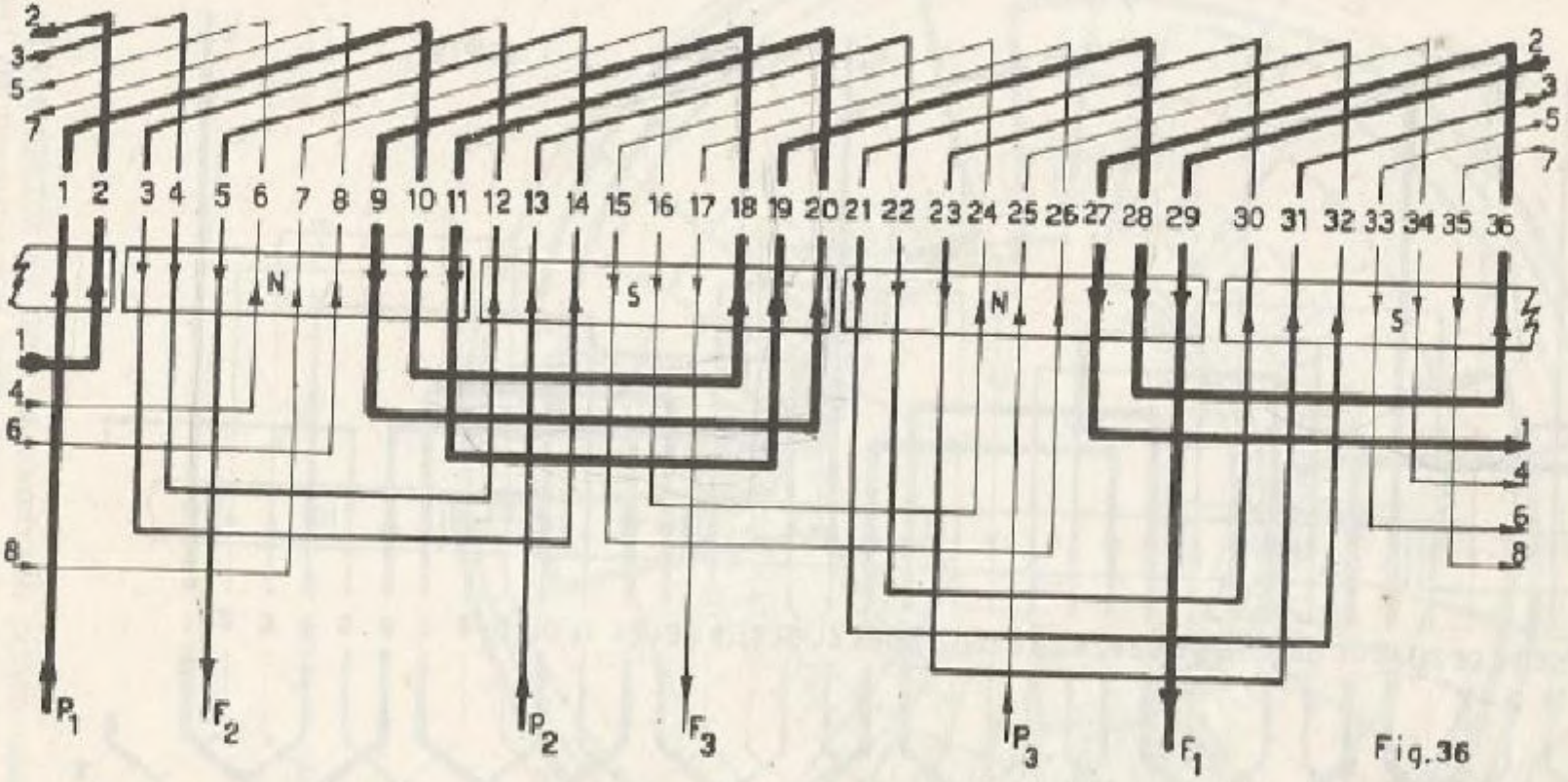


Fig. 36 — Motor de quatro pólos com enrolamento de uma só camada.

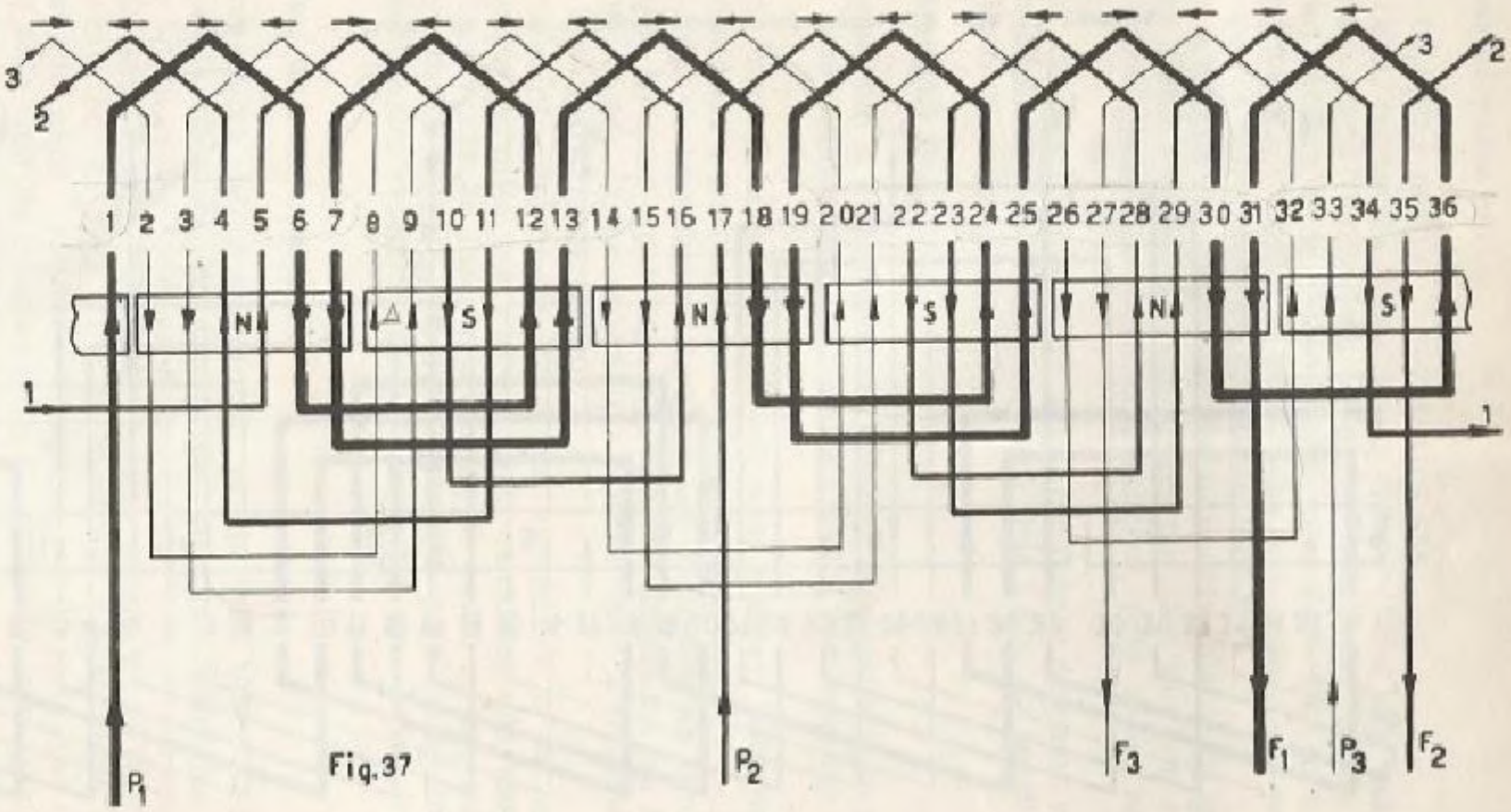


Fig. 37

Fig. 37 — **Bobinamento trifásico,** tipo meio imbricado, seis pólos.

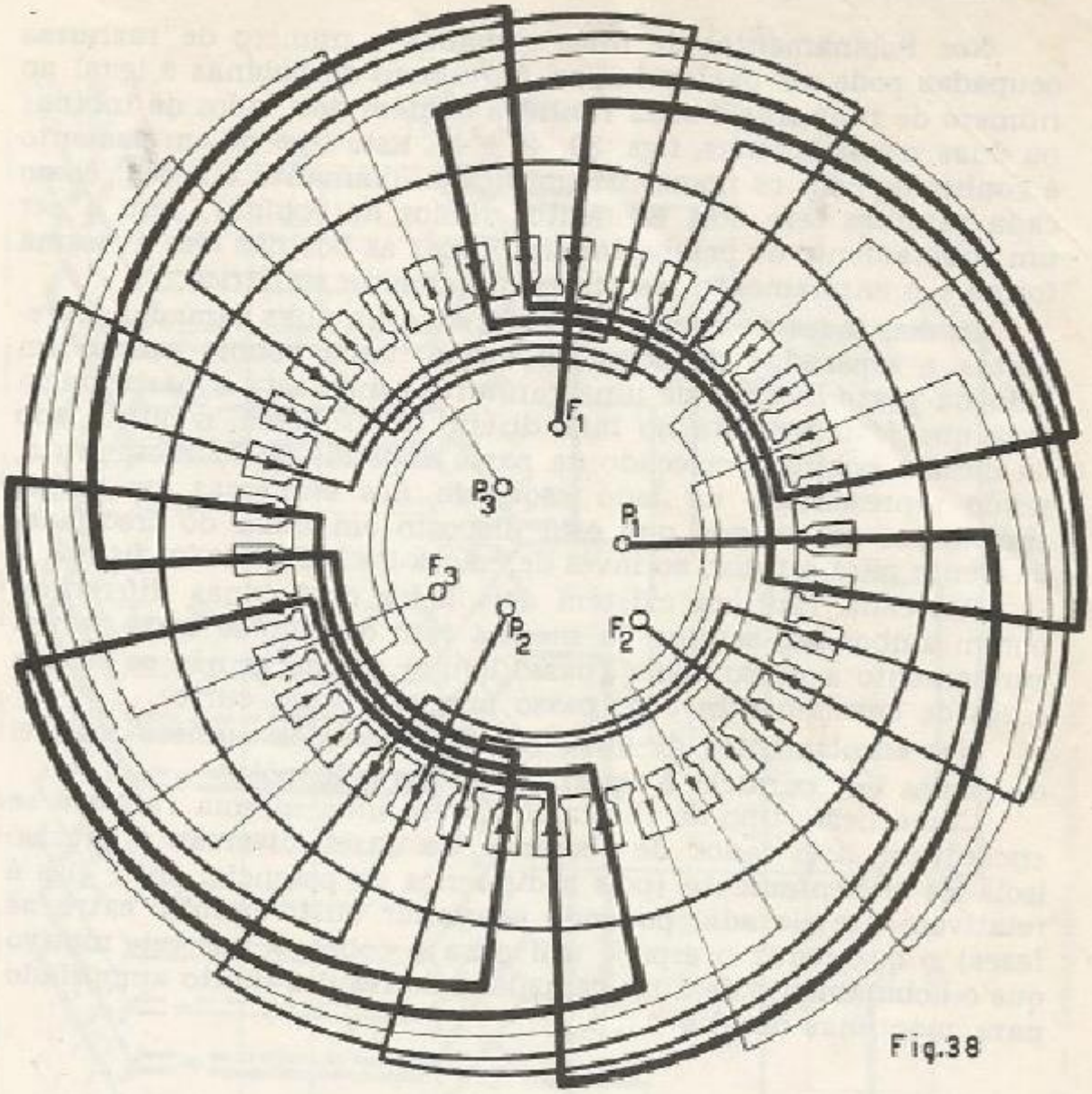


Fig.38

Fig. 38 — Enrolamento de uma só camada.

Os enrolamentos de uma camada são pouco usados, tendo a vantagem de permitir um isolamento mais perfeito entre as fases sem excessivo material isolante; por esta razão prestam-se para ser aplicados em máquinas cuja d.d.p. entre fases seja relativamente elevada.

Bobiramentos de duas camadas.

Nos bobinamentos de duas camadas o número de ranhuras ocupadas pode ser par ou impar. O número de bobinas é igual ao número de ranhuras e cada ranhura contém dois lados de bobinas ou duas meias bobinas, figs. 39, 40 e 41. Este tipo de enrolamento é conhecido com os nomes de imbricado, diamante e coroa; como cada ranhura tem dois elementos (lados de bobina), vem a ser um bobinamento de bobina inteira. Todas as bobinas têm a mesma forma e o enrolamento resulta perfeitamente simétrico.

Os dois lados de bobina são colocados em duas camadas sobrepostas e separadas da seguinte forma: cada bobina possui um lado na parte inferior de uma ranhura, sendo esta a parte tracejada que se representa no lado direito do esquema, o outro lado da mesma bobina é colocado na parte superior de outra ranhura, sendo representado no lado esquerdo dos esquemas em traços cheios, por ser o lado que está disposto em cima do tracejado, de frente para o rotor, ao invés de colocá-los lado a lado, fig. 42.

Em cada ranhura existem dois lados de bobinas diferentes, porém ambos são sempre da mesma fase quando se trata de um enrolamento a passo pleno (passo longo), o que já não se dá nos casos de enrolamentos com passo parcial (passo curto).

Nos enrolamentos de duas camadas o maior número possível de ramos em paralelo é igual ao número de pólos.

Como neste tipo de enrolamento em uma mesma ranhura se encontram dois lados de bobinas de fases diversas é preciso isolá-los eficientemente (pois a diferença de potencial entre eles é relativamente elevada, podendo ocasionar curto-circuito entre as fases) o que reduz o espaço útil para o cobre. É por este motivo que o bobinamento de duas camadas não resulta muito apropriado para máquinas de alta d.d.p.

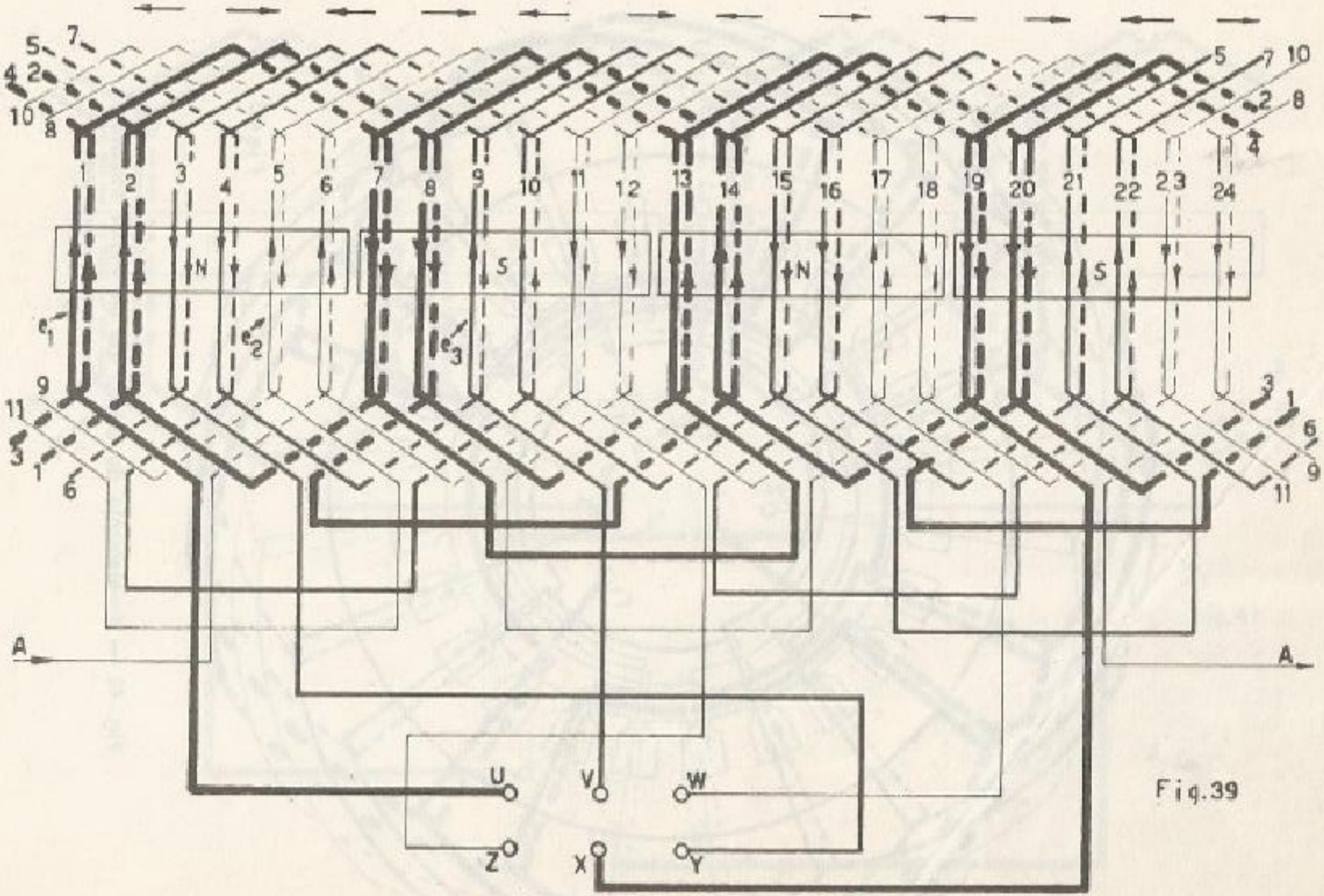


Fig.39

Fig. 39 — Bobinamento imbricado ou de duas camadas.

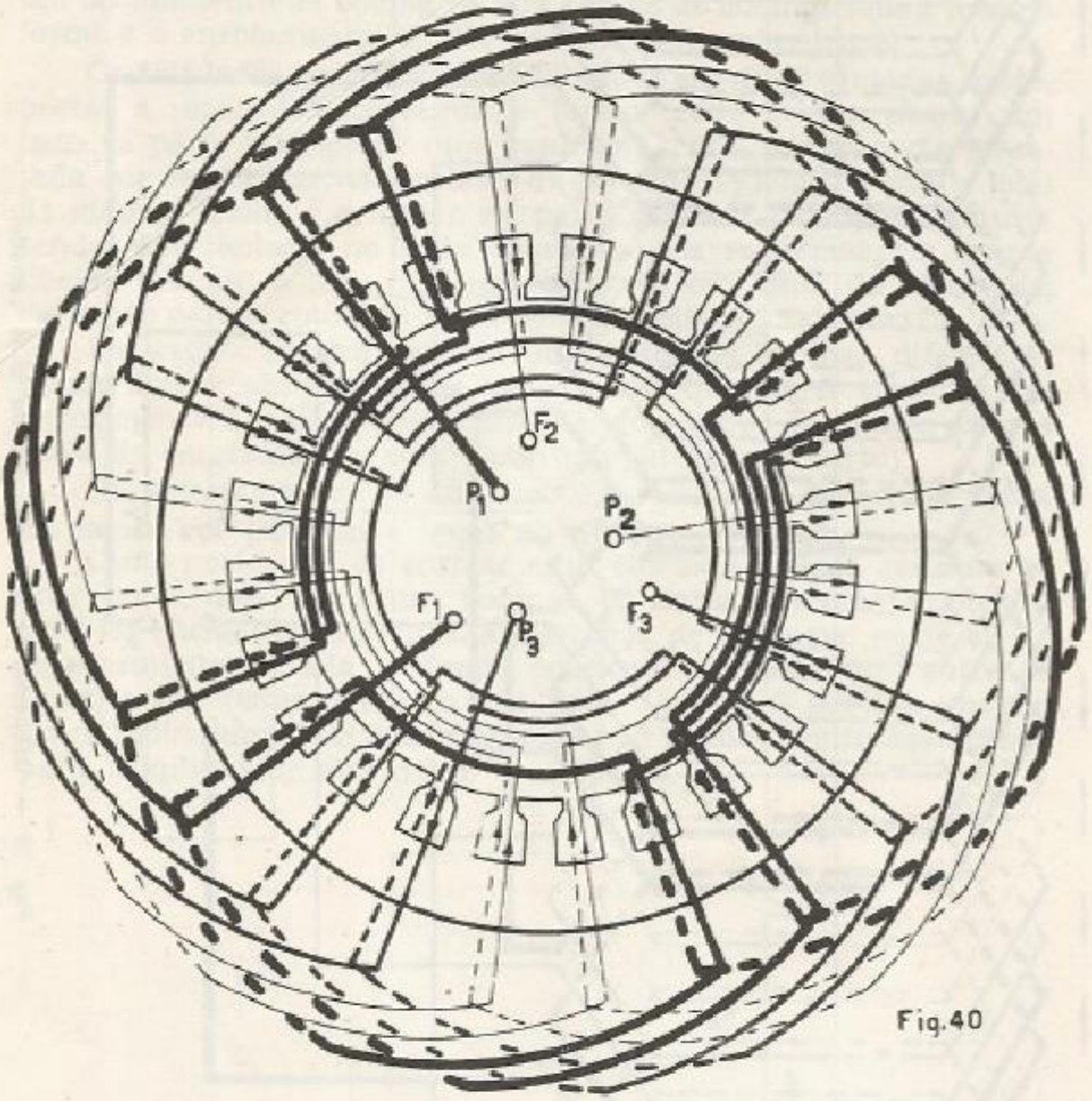


Fig. 40 — Enrolamento do estator de um motor trifásico.

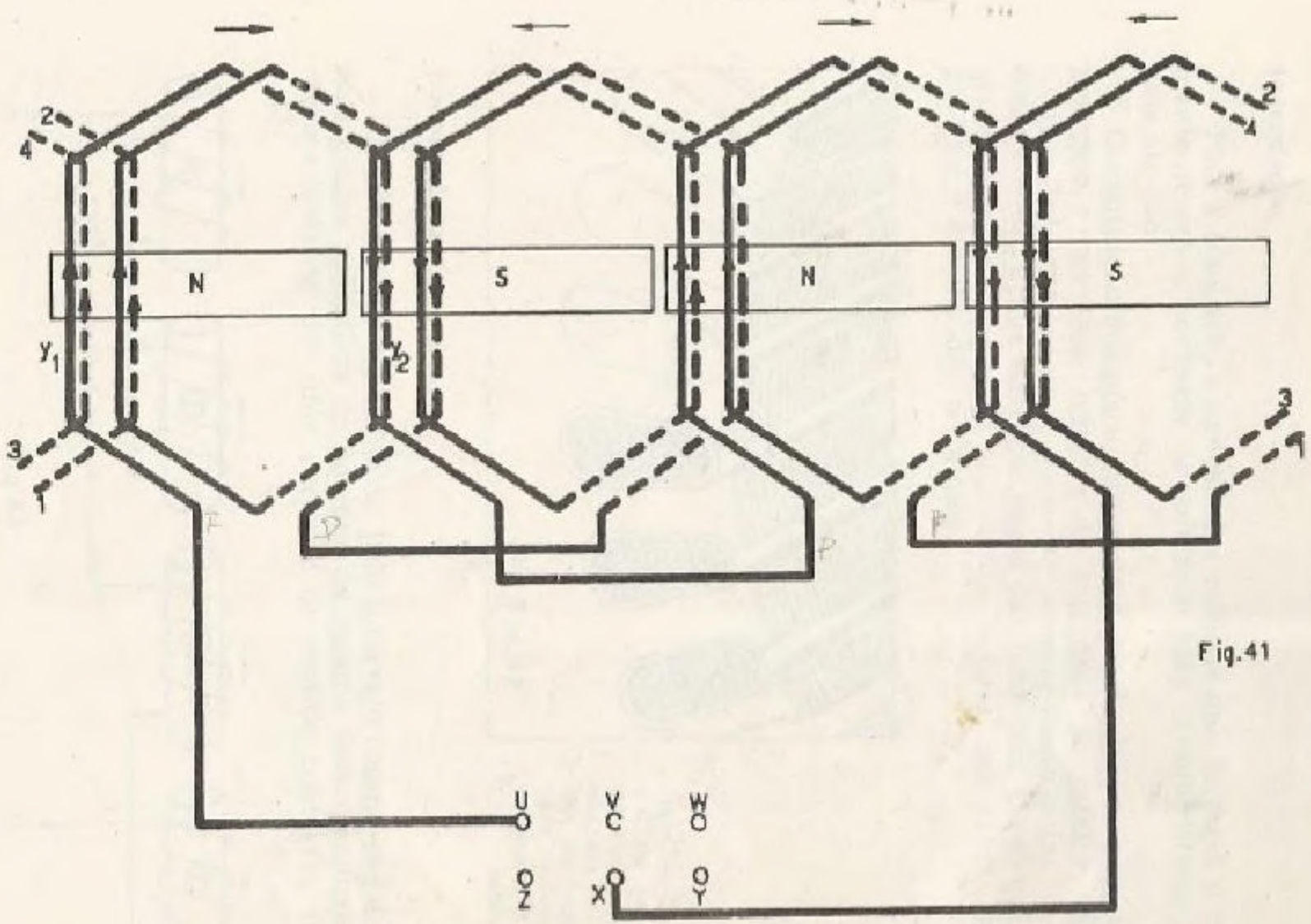


Fig.41

Fig. 41 — Diagrama mostrando apenas uma só fase do enrolamento de um motor de C.A. O bobinamento está distribuído em duas ranhuras por fase e por pólo.

Capitulo 10

CARACTERÍSTICAS DOS ENROLAMENTOS

Introdução.

Para a colocação e ligação das bobinas que formam o bobinamento devem-se conhecer de antemão suas características principais que são:

Constituição dos pólos, número de pólos, número de ranhuras por pólo e por fase, número de ranhuras do estator, bobinas, número total de bobinas, passo da bobina, passo polar, passo do bobinamento, graus elétricos, passo das ranhuras, passo das fases, grupos polares ou grupos de bobinas, bobinas por grupo, bobinas por fase e escolha dos terminais.

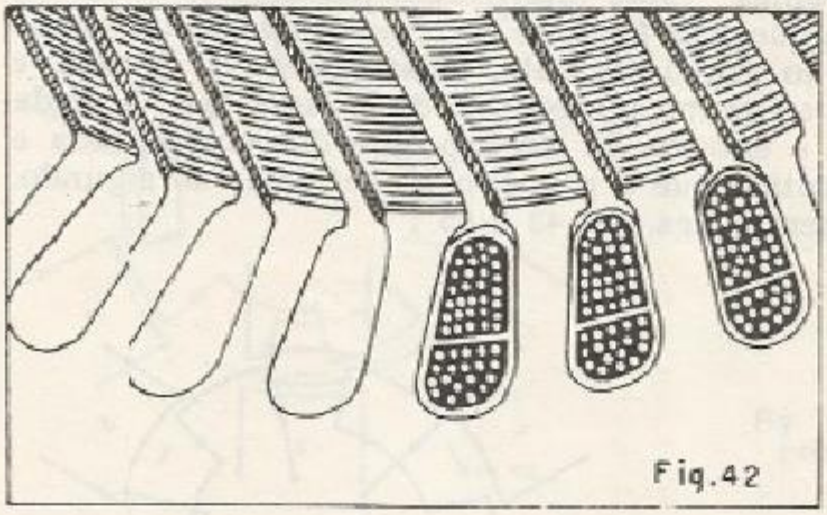


Fig. 42 — Corte parcial de um estator mostrando como são alojados os dois lados de bobina em cada ranhura de um enrolamento imbricado.

Constituição dos pólos.

Os pólos, estão constituidos, pelo intervalo compreendido entre dois grupos sucessivos de bobinas da mesma fase, percorridas no mesmo instante por uma corrente de sentido contrário, figs. 41 e 43.

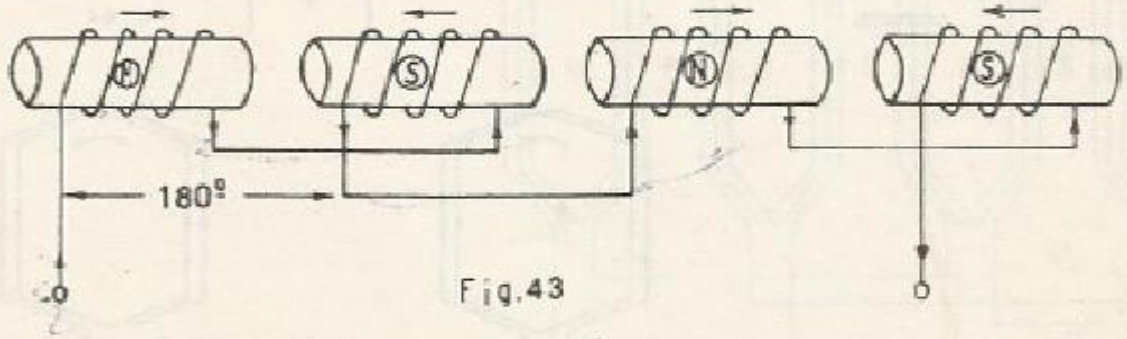


Fig. 43 — Constituição dos pólos.

Cada bobina, ou grupos de bobinas, que pertencem a uma divisão de pólo, se conectam com a bobina correspondente ao grupo de bobinas seguinte, invertendo as entradas e saídas para formar os pólos opostos, figs. 41 e 43.

Cada pólo representa 180 graus-espaço elétricos.

Segundo o número de grupos que compõem cada fase, os enrolamentos de corrente alternada classificam-se em bobinamentos "por pólo" e enrolamentos "por pólos conseqüentes":

Bobinamentos por pólos ou do tipo comum.

Chama-se enrolamento "por pólos", quando o número de grupos de bobinas por fase é igual ao "número de pólos", fig. 44. A f.e.m. em cada grupo de uma mesma fase, são alternativamente de sentido contrário, de tal forma que se um grupo considera o sentido convencional da marcha dos ponteiros do relógio, no grupo seguinte a f.e.m. induzida será em sentido contrário. As conexões dos "grupos de bobinas" estão alternadamente invertidas da seguinte forma: para que suas f.e.m. se somem, a saída de um grupo liga-se à entrada do grupo seguinte, invertendo-se a entrada e saída com relação ao grupo precedente, da mesma fase. A saída deste grupo liga-se à entrada do terceiro, que tem sua entrada e saída no mesmo sentido que o primeiro e contrárias ao segundo, e assim sucessivamente, figs. 41, 43 e 45.

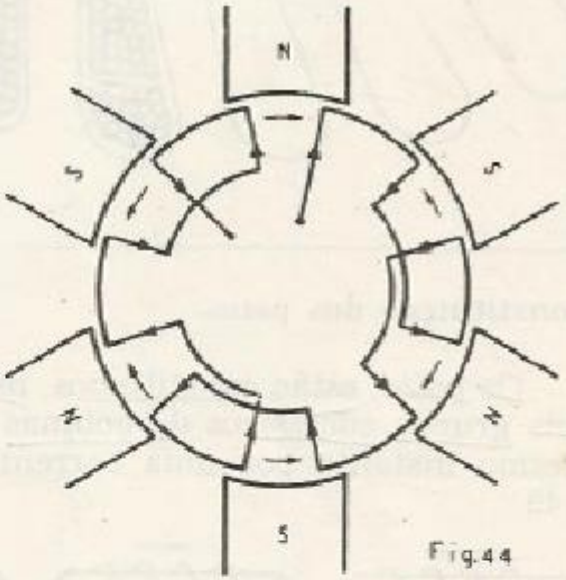


Fig. 44 — Bobinamento por-pólo ou do tipo comum.

Fig.44

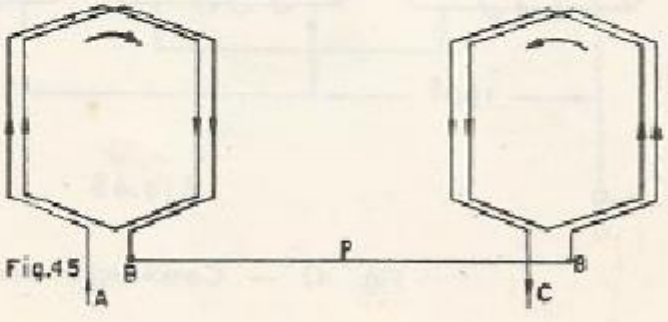


Fig. 45 — Ligação de grupos de bobinas.

Fig.45

Enrolamentos pelo método do "pólo conseqüente".

Bobinamentos do "pólo conseqüente" é quando o número de grupos de bobinas por fase é igual ao número de "pares de pólos", ou seja, para cada grupo de bobinas correspondem dois pólos, fig. 46. Nos enrolamentos de pólos conseqüentes, o sentido dos valores instantâneos das correntes é o mesmo para todos os grupos de bobinas da mesma fase. O final de cada grupo de bobinas liga-se com o princípio do grupo seguinte da mesma fase de modo que a corrente circulará em ambos no mesmo sentido, fig. 47, e o número de pólos será o dobro, que se o sentido da corrente fosse oposto em ambos os grupos, como acontece nos enrolamentos por pólos, fig. 48.

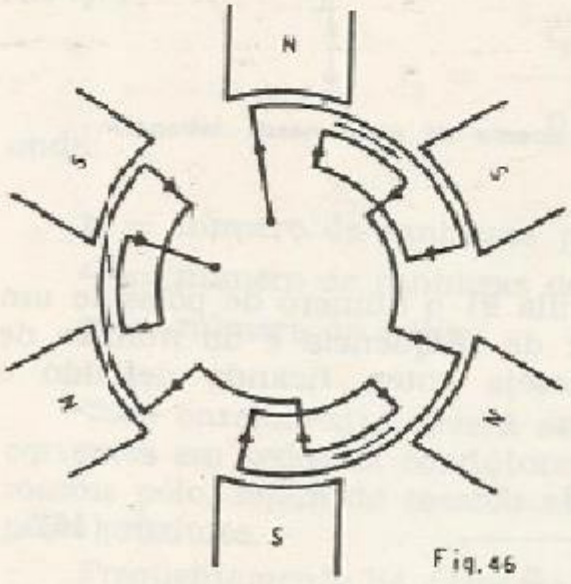


Fig. 46

Fig. 46 — Enrolamento pelo método do pólo conseqüente.

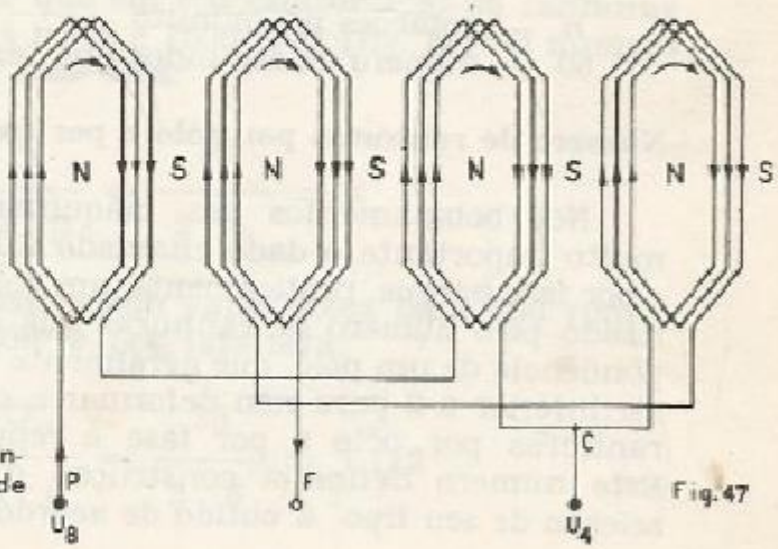


Fig. 47

Fig. 47 — Enrolamento de passo integral produzindo 8 pólos, metade dos quais são pólos S ou «pólos conseqüentes».

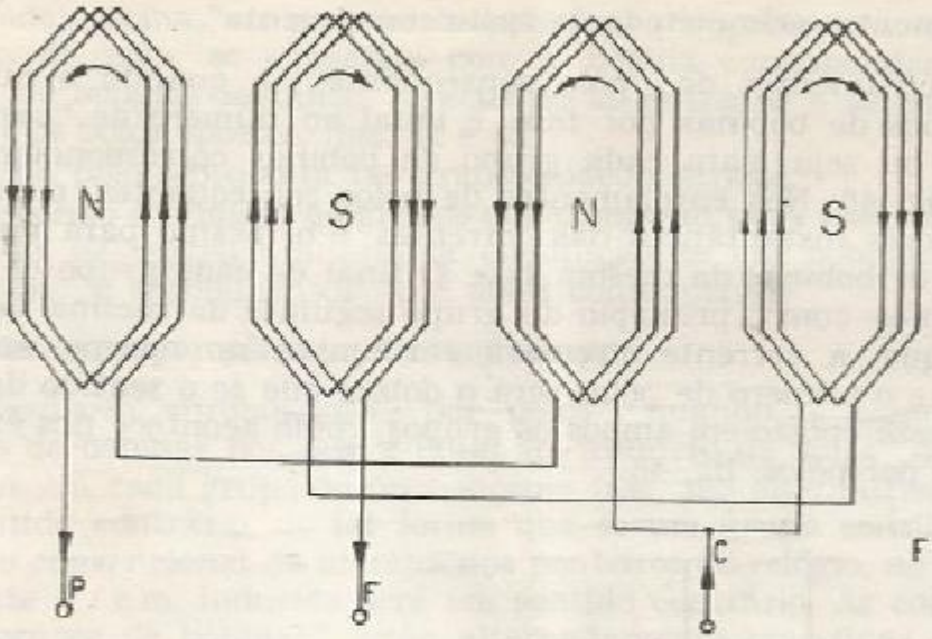


Fig. 48

Fig. 48 — Conexão para um enrolamento de meio passo, tetrapolar.

Número de pólos.

Como já foi explicado (fórmula 9) o número de pólos de um motor de C.A. depende do valor da freqüência e do número de rotações por minuto que se deseja obter, ficando definido o número dos pares de pólos assim

$$P = \frac{60 \cdot f}{n} \qquad (16)$$

onde:

P — número de pares de pólos.
f — freqüência em Hertz.
n — rotações por minuto.
60 — número de segundos que tem o minuto.

Número de ranhuras por pólo e por fase.

Nos bobinamentos das máquinas de corrente alternada é muito importante o dado chamado número de ranhuras por pólo e por fase porque, praticamente, um bobinamento de C.A. é caracterizado pelo número de ranhuras que cada fase possui em correspondência de um pólo, que geralmente varia de 2 até 6 (não devem ser inferior a 2 para não deformar a onda de C.A.). O número de ranhuras por pólo e por fase é representado pelo símbolo "q". Este número define a construção do enrolamento e influi na seleção de seu tipo. É obtido de acôrdo com a seguinte equação:

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} \qquad (17)$$

q = número de ranhuras por pólo e por fase.
Q = número de ranhuras do estator.
m = número de fases.
p = número de pólos.

Sabe-se que um grau geométrico é igual a p/2 graus elétricos (onde "p" é igual ao número de pólos) e que cada pólo representa sempre 180 graus-espaço elétricos.

Então teremos que o número de ranhuras por pólo será:

$$r_p = \frac{Q}{p} \qquad (18)$$

onde:

r_p = número de ranhuras por pólo.
Q = número de ranhuras do estator.
p = número de pólos.

Todo enrolamento deverá ser elaborado de tal forma que as correntes em todos os condutores de uma mesma fase, e de um mesmo pólo, sejam do mesmo sentido e de sentido contrário nos pólos próximos.

Freqüentemente há casos na prática que o número de ranhuras por pólo e por fase é fracionário, como por exemplo quando se trata de um motor de pólos comutáveis. Com o mesmo número de ranhuras do estator, o número de ranhuras por pólo e por fase para um enrolamento é inteiro e para outro e fracionário.

Por exemplo, um motor que em seu estator tem 36 ranhuras com um enrolamento para 4 pólos e 1500 rpm (fig. 89). O número de ranhuras por pólo e por fase será:

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{36}{3 \cdot 4} = 3$$

Este motor ao ser transformado em 8 pólos para 600 rpm o número de ranhuras por pólo e por fase será:

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{36}{3 \cdot 8} = 1\,1/2$$

Quando "q" é fracionário, temos o problema de selecionar as ranhuras pertencentes às diversas fases, o que exige algumas considerações, por exemplo; a escolha deve ser feita de modo tal que se obtenha o maior fator de distribuição possível para a freqüência fundamental.

As vantagens fundamentais quando "q" é fracionário são que: com o mesmo número de ranhuras o motor pode utilizar-se para distinto número de pólos mesmo com um passo muito reduzido de ranhuras; melhora notavelmente a forma de onda da f.em., como os grupos de cada fase estão descalados de fase entre si, esta circunstância faz diminuir os fatores do enrolamento dos harmônicos superiores em maior grau que o do harmônico fundamental; não exige que o número de ranhuras seja múltiplo do número de pólos, etc.

Número de ranhuras do estator.

O número de ranhuras do estator para um motor não pode ser arbitrário, este número é expresso pela seguinte fórmula quando "q" é um número inteiro:

$$Q = p \cdot m \cdot q \qquad (19)$$

onde:

Q = número de ranhuras do estator.
p = número de pólos.
m = número de fases.
q = número de ranhuras por pólo e por fase.

Bobinas.

Cada bobina é formada por várias espiras, e a cada espira correspondem dois condutores (duas porções ativas), fig. 49. Os condutores são isolados e ligados em série, figuras 35 e 50. Cada bobina apresenta um lado ou elemento embaixo de um pólo norte, e outro lado, embaixo de um pólo sul adjacente.

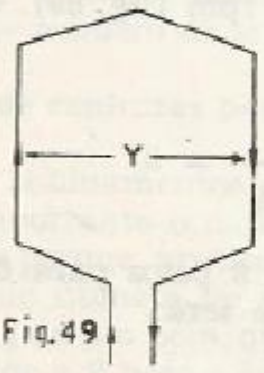


Fig. 49 — Bobina de um motor de C.A.

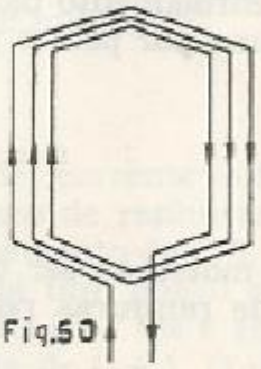


Fig. 50 — Bobina em espiral ou de passos diferentes.

As bobinas são ligadas formando grupos. Cada grupo é formado por uma bobina ou por várias (ligadas em série), que pertencem à mesma fase. Os grupos sucessivos de bobinas (de cada fase) ligam-se invertidos, para formar pólos consecutivos de polaridade alternada. A ligação dos grupos de bobinas (de cada fase) pode ser feita em série ou em paralelo.

Para simplificação dos diagramas de bobinamentos e facilitar sua interpretação, como já foi dito, usa-se uma única espira para representar uma bobina constituída por várias voltas de fio, indicando-se apenas o princípio e o final ou entrada e saída de cada bobina, independente do número de espiras e do formato de cada bobina. É óbvio que sempre haverá duas vezes tantos elementos (lados de bobina) quantas bobinas houver. A fig. 51, é uma fotografia de um grupo de três bobinas prontas para serem colocadas no estator.

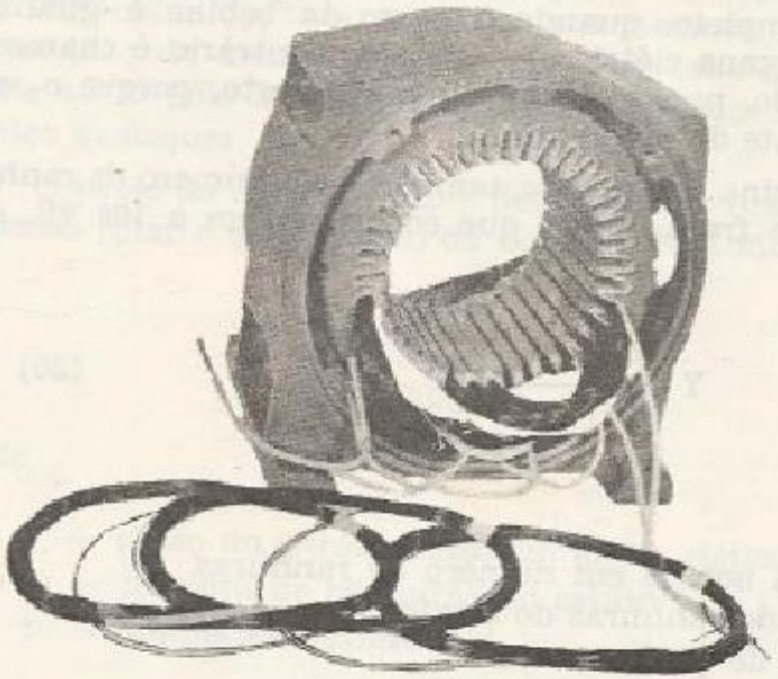


Fig. 51 — Bobinas prontas para serem colocadas no estator.

Gentileza Westinghouse

Número total de bobinas.

Os motores trifásicos têm seus bobinamentos formados por um número de bobinas que pode corresponder à metade do número de ranhuras quando o enrolamento é de uma camada, ou ao número de ranhuras quando se trata de um bobinamento de duas camadas. Como foi dito acima, essas bobinas são ligadas entre si, de modo a formarem três bobinamentos separados os quais se chamam fases.

Passo da bobina.

Passo da bobina é a largura de lado a lado de bobina ou o ângulo entre os eixos das ranhuras em que se acham os dois lados da bobina; pode ser igual ao passo polar (180 ºE) ou não.

O passo da bobina (tem por símbolo "Y", fig. 49) deve aproximadamente abraçar um vão polar, ou seja, que os dois lados de qualquer bobina devem ficar sob pólos adjacentes, de modo que, quando um dos lados da bobina está sob um pólo norte o outro deverá estar sob um pólo sul, fig. 41.

O passo da bobina "Y" pode chegar a ser igual a "q" (número de ranhuras por pólo e por fase). Um encurtamento maior não tem razão de ser porque faria aparecer nas ranhuras lados de bobinas, que sendo da mesma fase teriam correntes de sentidos contrários.

Se chama passo normal, passo total, passo integral, passo longo ou passo completo, quando o passo da bobina é igual ao passo polar (180 graus elétricos); em caso contrário é chamado de passo fracionário, passo parcial ou passo curto, porque o vão da bobina é diferente do passo polar.

O passo da bobina se expressa também pelo número de ranhuras e em partes de fração polar que correspondem a 180 ºE, segundo a fórmula:

$$Y = \frac{Q}{p} \qquad (20)$$

onde;

Y = passo da bobina em número de ranhuras.
Q = número de ranhuras do estator.
p = número de pólos.

Passo polar.

Passo polar de um motor elétrico é o ângulo entre os eixos de dois pólos contíguos, ou a distância entre os centros de dois pólos adjacentes, um norte, outro sul (fig. 41), medida ao longo da circunferência no entreferro, é sempre igual a 180 graus-espaço elétricos ou π radianos elétricos. Tem como símbolo "Y_p".

O passo polar de um motor elétrico é também o número de ranhuras ocupadas pelos grupos de uma mesma fase que formam um pólo norte e um pólo sul do motor, cada grupo pode constar de uma ou de várias bobinas, (fig. 41). O passo polar é determinado pela equação:

$$Y_p = \frac{d \cdot \pi}{p} \qquad (21)$$

onde:

Y_p = passo polar.
d = diâmetro interno do núcleo.
p = número de pólos.
π = 3,1416.

Passo do enrolamento

Passo do enrolamento, também chamado de passo polar por vários autores, é o ângulo ou a distância em que se acha um certo lado-de-bobina "y_1" sob o pólo N, e a ranhura em que se encontra outro lado da mesma bobina "y_2", que tem uma posição equivalente sob o pólo S adjacente, ou entre outros dois pontos equivalentes quaisquer, fig. 41.

O passo do enrolamento é determinado (da mesma forma que o passo polar e que o passo da bobina) pela fórmula:

$$y = \frac{Q}{p}$$

onde:

y = passo do enrolamento em graus elétricos.
Q = número de ranhuras do estator.
p = número de pólos.

Exemplo; na fig. 33 é apresentado um esquema de enrolamento espiralado onde as bobinas de um mesmo grupo são de passos diferentes e se expressam com os números: 10 — 3 = 7. 11 — 2 = 9. 12 — 1 = 11.

Para este tipo de enrolamento espiralado ou de bobinas concêntricas, o passo, de acordo com a fórmula ($y = Q/p$) é a média aritmética entre os passos das bobinas independentes. O passo médio é igual a média de 7, 9 e 11, assim:

$$y = \frac{7 + 9 + 11}{3} = 9$$

Normas para a indicação do passo

Se o passo polar ou do enrolamento se indica simplesmente assim, $y = 8$, poderá ser mal entendido para o técnico inexperiente que talvez interprete que se um lado-de-bobina está situado na 1ª ranhura, o outro lado deverá ser colocado na 8ª ranhura. Para se evitar esta falsa interpretação, nos esquemas e desenhos, é norma indicar o passo do bobinamento, com duas cifras que expressam os números das ranhuras nas quais se estabelecem cada lado-de-bobina. Por isto no lugar de $y = 8$ se escreve: passo do enrolamento 1 — 9, isto se interpreta assim; quando um lado de bobina se coloca na ranhura n.º 1, o outro lado da mesma bobina deve ser colocado na ranhura n.º 9. O passo é igual a 8, pois $1 + 8 = 9$.

No caso de (fig. 39) uma bobina que tiver seus lados colocados nas ranhuras 1 e 7, o passo será 6, devendo-se indicar assim, passo 1 — 7.

Graus elétricos

Conforme foi visto anteriormente, quando uma bobina gira em um campo magnético de um gerador simples bipolar (um par de pólos) dá origem a uma f.e.m. que pode ser apresentada por uma curva senoidal como a da fig. 25.

Uma volta completa da bobina realiza um passo completo de valores positivos e outro de valores negativos, isto é, quando a bobina completar uma revolução produzirá um ciclo e terá descrito um ângulo de 360 graus elétricos, ou seja 2π radianos elétricos, e a volta mecânica da bobina percorrido 360 graus geométricos.

Neste caso 1 grau mecânico equivale a 1 grau elétrico.

Como acabamos de ver, cada vez que a bobina percorre um par de pólos realiza um ciclo, ou sejam 360 graus elétricos.

Se o gerador é multipolar, sendo por exemplo tetrapolar (4 pólos), ao completar a bobina uma volta mecânica terá efetuado um percurso de 360 graus geométricos, e a f.e.m. induzida feito 2 ciclos, ou seja 720 graus elétricos. Em uma máquina de 4 pólos, 1 grau geométrico corresponde a 2 graus elétricos. Nas máquinas hexapolares (6 pólos) em uma volta mecânica a f.e.m. induzida percorre 3 ciclos elétricos, 1 grau geométrico equivale a 3 graus elétricos. Em uma máquina de oito pólos, 1 grau geométrico é igual a 4 graus elétricos e assim por diante. Desta forma o número de graus de uma circunferência é igual a:

$$°E = 360 \quad P \qquad (22)$$

onde;

°E = graus-espaço elétricos.
360 = graus-espaço geométricos.
P = número de pares de pólos.

Para se converter graus mecânicos em elétricos, deve-se multiplicar pelo número de pares de pólos, segundo a fórmula:

$$^{\circ}E = P \cdot {}^{\circ}G \qquad (23)$$

onde;

°E = graus-espaço elétricos.
P = número de pares de pólos.
°G = graus-espaço geométricos ou mecânicos.

Passo das ranhuras

Passo das ranhuras é o ângulo entre os eixos de duas ranhuras consecutivas, tem por símbolo "α", é determinado por:

$$\alpha = \frac{^{\circ}E}{Q} \qquad (24)$$

$$\alpha = \frac{180 \cdot p}{Q} \qquad (25)$$

onde;

α = alfa, letra minúscula do alfabeto grego que expressa o ângulo entre duas ranhuras adjacentes ou, número de graus elétricos correspondentes a 1 ranhura.
°E = graus elétricos da circunferência do estator.
Q = número de ranhuras do estator.
p = número de pólos.

De acordo com a equação 17 ($q = Q/m.p$; onde "q" é o número de ranhuras por pólo e por fase, "Q" o número de ranhuras do estator, "m" o número de fases e "p" o número de pólos) o ângulo elétrico entre ranhuras adjacentes é:

$$\alpha = \frac{60\ ^{\circ}E}{q} \qquad (26)$$

onde;

α — número de graus elétricos correspondentes a uma ranhura ou ângulo elétrico entre ranhuras consecutivas.
60°E — graus elétricos.
q — número de ranhuras por pólo e por fase.

O passo das ranhuras ou os graus elétricos correspondentes a uma ranhura poderão ser determinados pela seguinte fórmula:

$$\alpha = \frac{180 \cdot °E}{r_p} \qquad (27)$$

onde;

α — número de graus elétricos que correspondem a uma ranhura.
180°E — graus elétricos correspondentes a um pólo.
r_p — número de ranhuras em cada pólo.

Passos das fases

Para manter a simetria dos enrolamentos trifásicos, é indispensável que a distância entre os princípios das três fases (início de qualquer fase e o princípio da fase subseqüente) seja de 120 °E. Semelhante distância deverão ter também os finais das fases.

O passo das fases é o ângulo (θ_f) entre a ranhura em que se acha um certo condutor da fase "A" e a ranhura em que está o condutor mais proximo correspondente ao da fase "B", sendo o mesmo ângulo para a fase "C" com relação a fase "B", e o da fase "C" com relação a "A". Como foi dito acima este ângulo é de 120 °E, é expressado em número de ranhuras determinado pela fórmula:

$$\theta_f = \frac{120 \cdot °E}{\alpha} \qquad (28)$$

onde;

θ_f — passo das fases.
120°E — graus elétricos.
α — graus elétricos correspondentes a uma ranhura.

Grupos polares ou grupos de bobinas

Todas as bobinas de uma mesma fase formam grupos de acordo com o número de pólos e o número de ranhuras do estator.

É sabido que em um enrolamento bipolar trifásico, as bobinas das três fases formam dois pólos; norte e sul. Partindo deste princípio, se pode estabelecer uma dependência entre o número de bobinas e o de pólos, supondo inicialmente "q" inteiro. Assim, cada fase, em cada pólo ocupa "q" ranhuras e as bobinas correspondentes podem ser agrupadas juntas, constituindo o que se chama "grupo polar" ou grupo de bobinas. Por conseguinte, cada pólo tem 3 grupos, um grupo para cada fase; sendo o número total de grupos polares determinados por:

$$G_p = m \cdot p \qquad (29)$$

onde;

G_p = grupos polares ou número de grupos de bobinas.
m = número de fases.
p = número de pólos.

Bobinas por grupo

A forma de se obter o número de bobinas por grupo é dividindo-se o número total de bobinas, pelo número de grupos polares ou grupos de bobinas segundo a equação:

$$B_g = \frac{B_t}{G_p} \qquad (30)$$

onde;

B_g = bobinas por grupo.
B_t = número total de bobinas.
G_p = número de grupos polares ou grupos de bobinas.

Bobinas por fase

Nos enrolamentos de duas camadas ou de bobina inteira, onde o número de bobinas é igual ao número de ranhuras, a fórmula para se obter o número de bobinas por fase é:

$$B_f = \frac{Q}{m} \qquad (31)$$

e no bobinamento de uma camada ou de meia bobina, onde o número de bobinas é igual à metade do número de ranhuras será:

$$B_f = \frac{Q}{2 \cdot m} \qquad (32)$$

onde:

B_f = número de bobinas por fase.
Q = número de ranhuras do estator.
m = número de fases.

Escolha dos terminais

Como os enrolamentos se compõem de grupos iguais, contendo cada um o mesmo número de ranhuras por pólo e por fase e bobinas idênticas, um motor trifásico, qualquer que seja o tipo de seu bobinamento, e, se tem um só enrolamento, apresenta seis terminais, isto é, dois por cada fase representados pelo princípio e o fim da dita fase.

Após a colocação de todos os grupos no estator, seguindo-se um sentido previamente escolhido, devem ser eles ordenadamente numerados e os terminais (dois para cada fase) também serão identificados e numerados (P_1, F_1), (P_2, F_2) e (P_3, F_3) onde "P" significa princípio e "F" fim de cada fase.

É inteiramente arbitrária a escolha do terminal que se convenciona chamar de princípio "P", sendo o fim "F" imediatamente fixado; porém uma vez fixada a convenção para a primeira fase, deve ela ser seguida rigorosamente para as demais fases.

No estator é conveniente escolher a combinação do início de fases que exija cabos terminais de saída o mais curtos possíveis, ou seja escolher as ranhuras mais próximas da caixa de ligações, onde são conduzidos os terminais para que possamos: ligar o motor à linha, possibilitar as mudanças rápidas da conexão para estrêla ou para triângulo, mudança imediata da tensão em motores de dupla tensão, inversão do sentido de rotação, etc.

A representação do sentido de circulação da corrente e da constituição dos pólos nos esquemas dos enrolamentos, subentende-se que é imaginativo em um determinado instante qualquer do ciclo da corrente alternada, para facilitar sua rápida interpretação.

Distribuição das bobinas no rotor

No rotor a distribuição das bobinas deve ser feita de forma a manter mecanicamente equilibrado o rotor e proporcionar um

equilíbrio dinâmico. É conveniente escolher a combinação de princípios de fases situadas sobre ranhuras geometricamente simétricas, ou seja, a uma distância de 120 graus geométricos e não a 120 graus elétricos, com objetivo de manter equilibrados os esforços originados pela força centrífuga, porém observando as normas da simetria elétrica.

Nos rotores trifásicos só é possível adotar três ranhuras geometricamente equilibradas quando o número de pares de pólos não é múltiplo de 3. Se o número de pares de pólos é divisível por 3, os inícios das fases não poderão ser dispostos uniformemente pela circunferência, pelo que deverão ser escolhidas as três ranhuras o mais equilibradas possível.

ENROLAMENTOS EM QUE O NÚMERO DE RANHURAS POR PÓLO E POR FASE ("q") NÃO É UM NÚMERO INTEIRO

Enrolamentos fracionários

Um enrolamento é fracionário quando o número de ranhuras por pólo e por fase (q) não é um número inteiro. Estes bobinamentos se diferenciam dos que têm o número inteiro de ranhuras por pólo e por fase, em que com o enrolamento fracionário há que combiná-lo em grupos de distinto número de bobinas. Evidentemente não existem grupos com números fracionários de bobinas. A solução consiste em construir grupos com "N" bobinas e grupos "N + 1" bobinas.

Os bobinamentos fracionários subdividem-se em dois outros: enrolamentos balanceados e bobinamentos não balanceados.

Estudaremos apenas os enrolamentos balanceados, isto é, aqueles em que as f.e.m. induzidas têm a mesma amplitude e igual defasagem.

Os bobinamentos não balanceados só são empregados em casos extremos, pois acarretam várias características indesejáveis, como por exemplo: grande desenvolvimento de calor, maior vibração, ruído, corrente de circulação, etc.

Enrolamentos balanceados

Quando o número de ranhuras por pólo e por fase não é um número inteiro é necessário especificar a ordem de colocação dos grupos. O diagrama de ligações não difere do usado quando "q" (número de ranhuras por pólo e por fase) é inteiro.

Os enrolamentos geralmente usados são os de duas camadas; os de uma camada são raros.

Para elaborar o esquema de um enrolamento com número fracionário de ranhuras por pólo e por fase ("q") são necessárias as seguintes condições: Cada fase deverá ter igual número de ranhuras, o mesmo número de bobinas e os grupos simetricamente distribuídos, do contrário o enrolamento resulta assimétrico.

O bobinamento terá que ser de duas camadas. O número de pólos deverá ser múltiplo do denominador da fração que exprime o valor de "q", o menor número de pólos poderá ser igual ao denominador (se este for par). O denominador da fração que exprime o valor de "q" não poderá ser múltiplo do número de fases e o enrolamento deverá ser de passo fracionário, etc.

Com um número qualquer de pares de pólos, não divisível por 3, obtém-se três fases iguais se "Q" (número de ranhuras) é divisível por 3. Se o número de pares de pólos é múltiplo de 3, é necessário que o número de ranhuras "Q" seja divisível por 3×3. Quando o número de pares de pólos contém duas vezes o fator 3, é preciso que o número de ranhuras contenha três vezes este fator 3, e assim sucessivamente. Sem isto é impossível se ter um enrolamento balanceado.

EXERCÍCIO — 1

Preparar o esquema de um enrolamento fracionário de duas camadas para um motor trifásico de 6 pólos, com um estator de 27 ranhuras.

Este bobinamento é possível porque o número de pares de pólos "P" é divisível por três e o número de ranhuras é múltiplo de 3×3.

O número de ranhuras por pólo e por fase segundo a fórmula 17 é:

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{27}{3 \cdot 6} = 1\ 1/2$$

Como cada grupo deve ter um número inteiro de bobinas, o enrolamento é composto de grupos alternativos, tendo uma e duas bobinas respectivamente cada um destes grupos; assim cada fase tem em 6 pólos, 3 grupos com 2 bobinas e 3 grupos com 1 bobina, pois perfaz:

$$3 \cdot 2 + 3 \cdot 1 = 9 \text{ bobinas por fase.}$$

Cada fase tem nos 6 pólos; $\frac{9}{6} \cdot 6 = 9$ ranhuras.

O passo da bobina (fórmula 20) será:

$$Y = \frac{Q}{p} = \frac{27 \text{ ranhuras}}{6 \text{ pólos}} = 4{,}5$$

Como o passo tem que ser sempre um número inteiro, devem-se colocar as bobinas com um passo de 4 ou 5 ranhuras. Escolhe-se o passo curto de 4 ranhuras ou passo 1 — 5.

A fig. 52 mostra o diagrama dêste enrolamento.

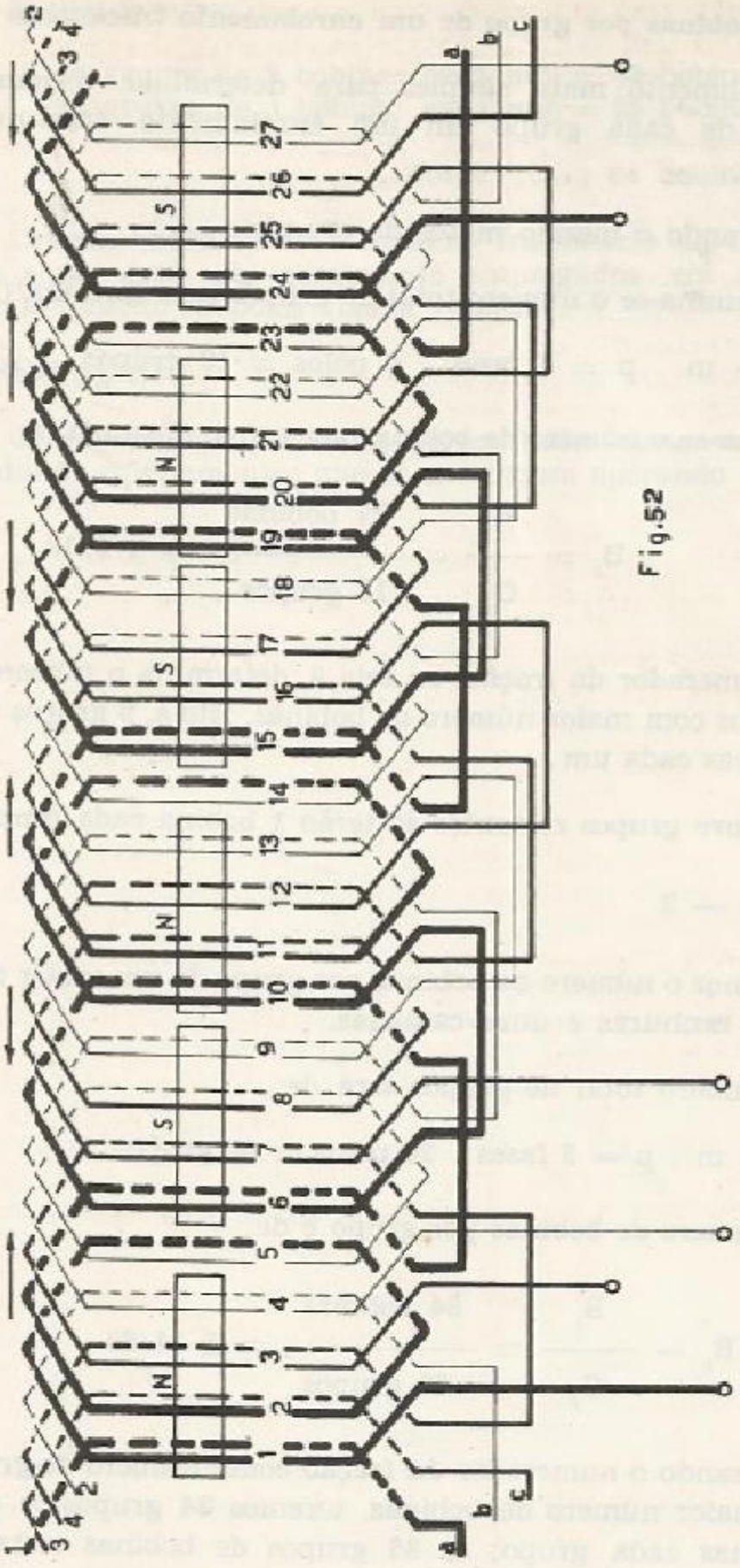


Fig. 52 — Esquema de um enrolamento trifásico com número fracionário de ranhuras por pólo e por fase.

Número de bobinas por grupo de um enrolamento fracionário

O procedimento mais simples para determinar o número de bobinas de cada grupo em um enrolamento fracionário é o seguinte:

Considerando o mesmo motor do exercício — 1.

a) Determina-se o número total de grupos pela fórmula (29):

$$G_p = m \cdot p = 3 \text{ fases} \cdot 6 \text{ pólos} = 18 \text{ grupos.}$$

b) Obtém-se o número de bobinas por grupo, fórmula 30:

$$B_g = \frac{B_t}{G_p} = \frac{27 \text{ bobinas}}{18 \text{ grupos}} = 1\ 9/18$$

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO E CULTURA
ESCOLA TÉCNICA FEDERAL DE PERNAMBUCO
BIBLIOTECA
12004

c) O numerador da fração, ou seja 9, determina o número de grupos com maior número de bobinas, isto é, 9 grupos de 2 bobinas cada um.

d) Os nove grupos restantes só terão 1 bobina cada grupo.

EXERCÍCIO — 2

Determinar o número de bobinas por grupo de um motor com: 20 pólos, 84 ranhuras e duas camadas.

a) O número total de grupos será de:

$$G_p = m \cdot p = 3 \text{ fases} \cdot 20 \text{ pólos} = 60 \text{ grupos.}$$

b) O número de bobinas por grupo é de:

$$B_g = \frac{B_t}{G_p} = \frac{84 \text{ bobinas}}{60 \text{ grupos}} = 1\ 24/60$$

c) Utilizando o numerador da fração como número de grupos de maior número de bobinas, teremos 24 grupos de duas bobinas cada grupo; os 36 grupos de bobinas restantes serão de 1 bobina cada grupo.

d) Verificação:

24 grupos de 2 bobinas cada um = 48 bobinas
36 grupos de 1 bobina cada um = 36 bobinas

Total ..... 84 bobinas

Os enrolamentos com número fracionário de ranhuras por pólo e por fase são geralmente empregados em máquinas de grande número de pólos (baixa rotação).

OBSERVAÇÃO

Os esquemas e exercícios apresentados neste manual foram tirados de equipamentos que se encontram operando na indústria.

Capítulo 11

PRINCÍPIOS GERAIS DOS ENROLAMENTOS DE C.A.

Condições dos bobinamentos.

As condições que devem cumprir os enrolamentos de corrente alternada para o bom funcionamento e economia dos motores são:

a) Satisfazer certas condições de simetria com respeito aos circuitos e condutores elétricos;

b) Todas as fases deverão ter o mesmo número de espiras;

c) Nos bobinamentos com circuitos em paralelo é necessário que eles sejam eletricamente equivalentes, todos os circuitos deverão ter a mesma resistência elétrica, a mesma reatância e estar submetidos às mesmas f.e.m.;

d) As fases devem estar defasadas no mesmo ângulo característico do sistema;

e) Todas as ranhuras devem ser idênticas e espaçadas do mesmo ângulo, etc.

Sabe-se que os enrolamentos de corrente contínua normalmente são constituídos por bobinas de circuito fechado, por se iniciar e terminar o bobinamento no mesmo ponto e, porque a tomada de corrente, efetua-se sobre lâminas do comutador constantemente distintas.

Os enrolamentos de corrente alternada tanto podem ser fechados como abertos. A conexão em triângulo dá um arranjo de bobinas em circuito fechado, e a conexão em estrela um bobinamento com circuito aberto. As tomadas de corrente efetuam-se em pontos fixos, ou seja, nos extremos de cada fase. Como conseqüência será possível acoplar os condutores de uma fase numa ordem qualquer, sempre que entre seus extremos se obtenha a f.e.m. resultante da soma das que se produzem em todos eles.

O número de ranhuras por pólo e por fase é um fator importante, não se usando quase uma única ranhura por pólo, porque não se aproveita economicamente o espaço disponível no induzido e resulta uma onda deformada de voltagem. Para se evitar a deformação da onda de C.A. não deve ser inferior a dois (2) o número de ranhuras por pólo e por fase.

Os princípios que regulam para a fabricação dos bobinamentos de corrente contínua valem também para os dos motores de corrente alternada.

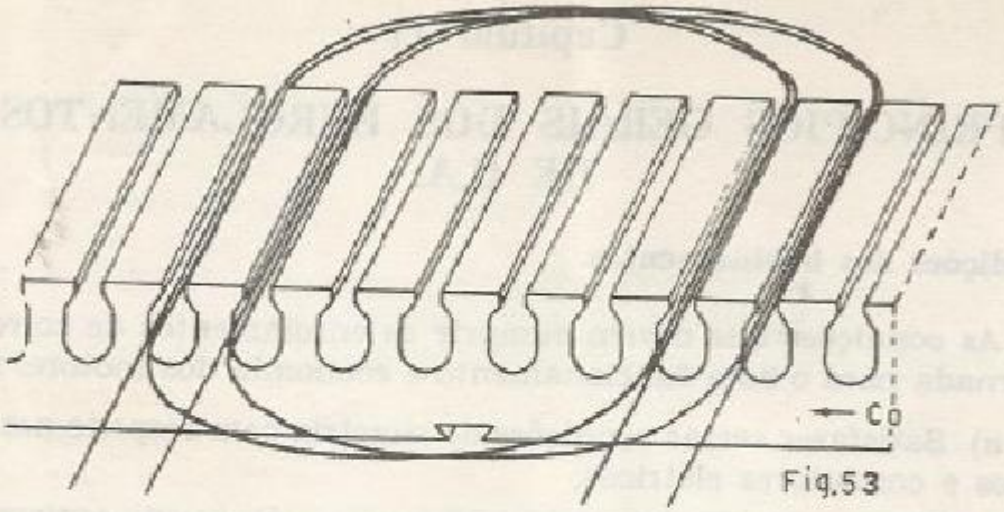


Fig. 53 — Supõe-se que o núcleo do estator da fig. 29, é cortado por «Co» e depois estendido sobre um plano.

REPRESENTAÇÃO DOS ESQUEMAS DE ENROLAMENTOS

Para simplificar os diagramas, a superfície dos enrolamentos aparece plana. As bobinas e ligações representam-se por meio de um esquema desenvolvido, figs. 39 e 53, tal como seria obtido se o bobinamento fosse cortado em um ponto e depois estendido sobre um plano.

Um tipo especial de representação é mostrado nas figs. 38 e 40. Supõe-se que o enrolamento foi colocado em uma prensa e forçado até que todo o motor tenha ficado achatado sobre um plano.

Outro método é a representação dos esquemas em perspectiva. Este sistema é pouco empregado porque somente mostra uma pequena parte do bobinamento e não indica com clareza as ligações através dos distintos grupos.

TRAÇADO DO ESQUEMA DE UM ENROLAMENTO

O traçado de um esquema não apresenta muita dificuldade. Traça-se o diagrama representativo do estator ou do rotor supondo-se como já foi dito, que o motor é cortado em um ponto qualquer e estendido sobre um plano. Embora este método quebre a continuidade, é o de mais rápida e fácil execução e mostra as espiras não deformadas. O esquema é particularmente importante para realização e verificação do trabalho de oficina.

Para que se possa traçar inteiramente um esquema dever-se-á ter os dados mais importantes que são: número de ranhuras, número de pólos, número total de bobinas, número de bobinas por fase e número de bobinas por grupo.

EXERCICIO — 3

Exemplifica-se o esquema do estator de um motor trifasico tetrapolar com 24 ranhuras, duas camadas e passo integral, fig. 39.

O esquema é realizado dispondo-se três enrolamentos monofásicos idênticos os quais são chamados fases, deslocados um com respeito ao outro de 120 °E, de maneira que as f.e.m. neles resultem defasadas de 1/3 de período.

Como se sabe, os motores de duas camadas têm seus enrolamentos formados por um número de bobinas igual ao de ranhuras, logo este bobinamento se compõe de 24 bobinas idênticas, porque a periferia interna do núcleo do estator contém 24 ranhuras.

Em uma folha de papel representam-se com algarismos o mesmo número de ranhuras que contém o estator e dá-se distribuição uniforme a fim de que as mesmas fiquem equidistantes entre si.

Traçam-se 48 linhas verticais que representarão os lados das bobinas que se encontram colocados de dois em dois, em cada uma das 24 ranhuras. O traço do lado esquerdo de cada ranhura desenha-se cheio porque é o lado da bobina que fica na parte de cima da ranhura, e o lado direito em traços interrompidos por ser o lado da bobina que se coloca no fundo da ranhura.

Divide-se este plano em tantos setores quantos são os pólos. Neste caso serão 24 ranhuras/4 pólos — 6 ranhuras por pólo.

Em cada pólo traçam-se três grupos de ranhuras, sendo cada grupo composto do número correspondente de ranhuras por pólo e por fase. No caso considerado e de acordo com a fórmula "17", teremos;

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{24 \text{ ranhuras}}{3 \text{ fases} \cdot 4 \text{ pólos}} = 2 \text{ ranhuras por pólo e por fase.}$$

Neste bobinamento para cada pólo existem portanto 2 ranhuras reservadas para cada fase.

Marcam-se todas as ranhuras da primeira fase, seguindo-se um sentido previamente escolhido para a circulação da corrente em um pólo, sendo o mesmo sentido nas ranhuras da mesma fase em cada pólo; no pólo adjacente deve-se marcar em sentido contrário e assim sucessivamente. As ranhuras da segunda fase marcam-se em sentido contrário ao da primeira com traços mais finos para se destacar da primeira no diagrama, e os da terceira fase com traços hachurados para que se destaque das outras duas, dando à corrente um sentido contrário ao da segunda fase. Os traços das fases coloridas em vermelho, azul e preto tornam muito mais compreensíveis os esquemas.

Determina-se o passo da bobina (fórmula 20), que será:

$$Y = \frac{Q}{p} = \frac{24 \text{ ranhuras}}{4 \text{ pólos}} = 6; \quad \text{passo } 1 - 7.$$

Traçam-se as bobinas da primeira fase conforme a fig. 41. Ligam-se em série todas as bobinas que formam os grupos, observando-se em todas que a corrente circula no mesmo sentido. Não há ligações a fazer quando o motor tem uma bobina apenas por pólo e por fase, isto é, o grupo é formado por uma só bobina (ou na prática, quando as bobinas foram enroladas em moldes múltiplos).

Calcula-se o número de grupos polares de acordo com a fórmula 29, que dará:

$$G_p = m \cdot p = 3 \text{ fases} \cdot 4 \text{ pólos} = 12 \text{ grupos.}$$

Como em um motor todas as fases têm o mesmo número de grupos, este do exemplo terá para cada fase: 12 grupos/3 fases = 4 grupos de bobinas por fase.

O número de bobinas por fase será:

$$B_f = \frac{Q}{m} = \frac{B}{m} = \frac{24 \text{ bobinas}}{3 \text{ fases}} = 8 \text{ bobinas por fase, onde:}$$

B_f = número de bobinas por fase. Q = número de ranhuras do estator.

m = número de fases. B = número de bobinas.

O número de bobinas por grupo é:

$$B_g = \frac{B_t}{G_p} = \frac{24 \text{ bobinas}}{12 \text{ grupos}} = 2 \text{ bobinas por grupo.}$$

As ligações dos grupos se faz de modo que a corrente circule alternadamente, no primeiro grupo no sentido dos ponteiros do relógio; no segundo em sentido contrário e assim sucessivamente, figs. 39 e 41. Os bornes terminais das fases serão indicados arbitrariamente com P_1 e F_1 representando respectivamente o princípio e o fim da fase. Os princípios de cada fase deverão ser tomados da parte de cima das ranhuras, e os finais dos lados de bobina que ficam nos fundos.

Traça-se o início da segunda fase em correspondência com a ranhura que resulte deslocada de 120° E em relação ao início P_1 da primeira fase, iniciando-se a 1/3 do número total de ranhuras do motor com relação à fase anterior, portanto a fase segunda P_2 deverá ter origem a 9 ranhuras para a direita do ponto onde começa a primeira fase P_1. O fim da segunda fase F_2 terá que ser localizado também a 9 ranhuras para a direita do final F_1.

O diagrama é simétrico e a segunda fase é exatamente igual à primeira (não é necessário desenhar o esquema da segunda fase, basta dar detalhes de uma fase e as entradas e saídas das demais) iniciando-se em P_2 e terminando-se em F_2.

A terceira fase P_3 traça-se com raciocínio análogo ao exposto no caso anterior. Partindo-se de P_2 e pulando-se 8 ranhuras para direita (9 ranhuras do ponto onde começa a segunda fase) será o princípio P_3 da terceira fase. O final F_3 é localizado partindo-se de F_2 e saltando-se 8 ranhuras para a direita onde será marcado o dito final F_3 da terceira fase.

A terceira fase (também não precisa ser desenhada) é exatamente igual à primeira, devendo-se iniciar em P_3 e se terminar em F_3.

Para verificar se o esquema está correto, traça-se uma flecha por cima de cada grupo indicando a direção da corrente nos condutores, observando que, alternadamente, os grupos de bobinas devem ser percorridos em sentidos contrários, como mostram os diagramas das figs. 39 e 41.

É recomendável a repetição de alguns exercícios com diagramas de diversos esquemas, para se poder obter um completo domínio da técnica do bobinamento de motores elétricos, já que por analogia das explicações dadas acima, pode-se confeccionar esquemas para outros enrolamentos.

ENROLAMENTO DE ROTORES

Os diagramas de bobinamentos de estatores, servem ao enrolamento de rotores e devem ter o mesmo número de pólos do estator.

A construção do estator de um motor síncrono é praticamente igual à de um motor assíncrono, os rotores porém são diferentes.

O rotor dos motores síncronos, como foi dito em capítulos anteriores, é uma combinação dos rotores do alternador e do motor assíncrono, sendo alimentado com corrente contínua e age como um ímã.

O rotor dos motores assíncronos não precisa alimentação externa. Os bobinamentos comumente empregados são os chamados tipos "gaiola de esquilo" ou "rotor em curto-circuito" e o de "rotor bobinado". Não obstante, não serem diretamente supridos pela fonte de energia, os rotores são postos a girar pelo campo magnético formado pelas bobinas do estator.

Rotor em curto-circuito ou gaiola de esquilo.

Neste tipo o enrolamento do rotor consiste em barras de cobre, de alumínio ou então de alguma liga metálica que são instaladas nas ranhuras formando uma verdadeira gaiola, unidas em cada extremidade e soldadas entre si em curto-circuito por meio de dois anéis laterais de cobre ou de bronze, tornando mais fácil a construção do rotor.

Não há necessidade de isolamento entre o núcleo e as barras de cobre devido a que as tensões geradas nas barras da gaiola são muito baixas.

Os tipos mais comuns destes rotores são:

a) "Gaiola de esquilo" de uso mais generalizado. O formato da ranhura nestes rotores varia bastante nas diversas aplicações, porque desta maneira se adapta a característica de funcionamento ao serviço a que se destina o motor.

b) "Dupla gaiola de esquilo" é empregado onde se exige um conjugado de partida elevado. Este tipo de rotor tem pequena variação de velocidade e baixa resistência durante o funcionamento. Recorre-se à dupla ranhura para o emprego de duas gaiolas, uma de alta resistência ôhmica situada na parte de cima das ranhuras e outra de baixa resistência elétrica colocada no fundo. Para obter uma característica adequada geralmente empregam-se materiais diferentes em cada ranhura ou gaiola.

O rotor com o enrolamento tipo gaiola é uma peça quase indestrutível, podendo suportar altas temperaturas sem se estragar.

Entre o estator e o rotor é usado o menor entreferro possível com a finalidade de aumentar a intensidade do campo magnético.

Rotor bobinado.

Ao calcular o enrolamento do rotor do motor assíncrono deve-se ter em consideração certas condições derivadas de sua relação com o próprio motor, como por exemplo:

a) O número de pólos do enrolamento do rotor tem que ser igual ao do bobinamento do estator;

b) O número de fases dos enrolamentos do estator e do rotor podem ser diferentes, não apresentando por isso nenhuma anormalidade. Por exemplo; um motor em que o enrolamento de seu estator é trifásico hexapolar pode ter um rotor bobinado bifásico ou trifásico, porém deverá ter seis pólos como o estator.

O rotor bobinado tem geralmente um enrolamento trifásico em tudo similar ao do estator. Os terminais das três fases estão ligados a três anéis deslizantes independentes, aos quais são aplicadas escovas. Cada um dos três anéis fazem conexão com um reostato de partida ligado em "Y", figs. 54 e 55. Os três contatos deslizantes se movem conjuntamente de modo que as três resistências são sempre iguais.

A resistência é intercalada no circuito do rotor para proporcionar baixa corrente de partida e um momento potente de arranque, sendo gradativamente retirada com o aumento da velocidade até que finalmente se anula e os três anéis são postos em curto-circuito.

A fig. 56, mostra o esquema de um enrolamento ondulado, de rotor com 4 pólos e 24 ranhuras.

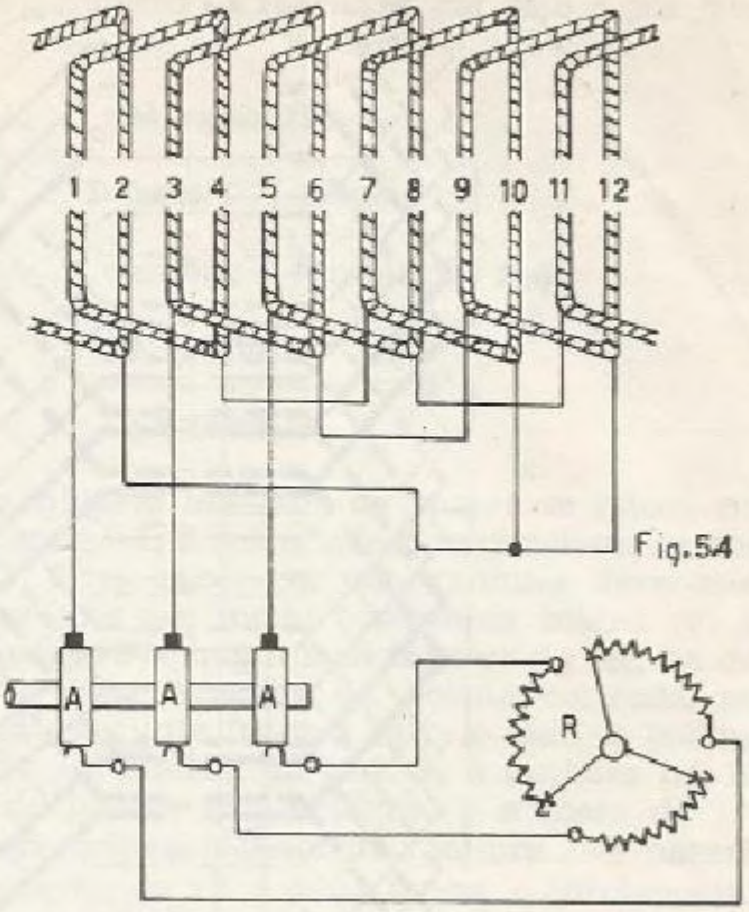


Fig.54

Fig. 54 — Enrolamento de rotor. A — anéis. R — reóstato.

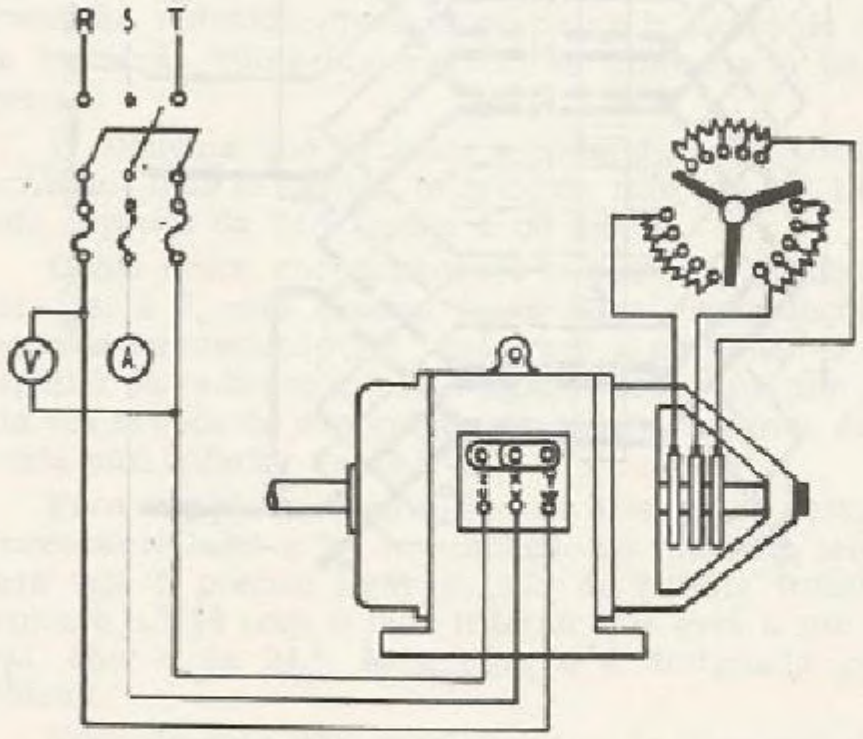


Fig.55

Fig. 55 — Método de arranque de motor trifásico de anéis (rotor bobinado).

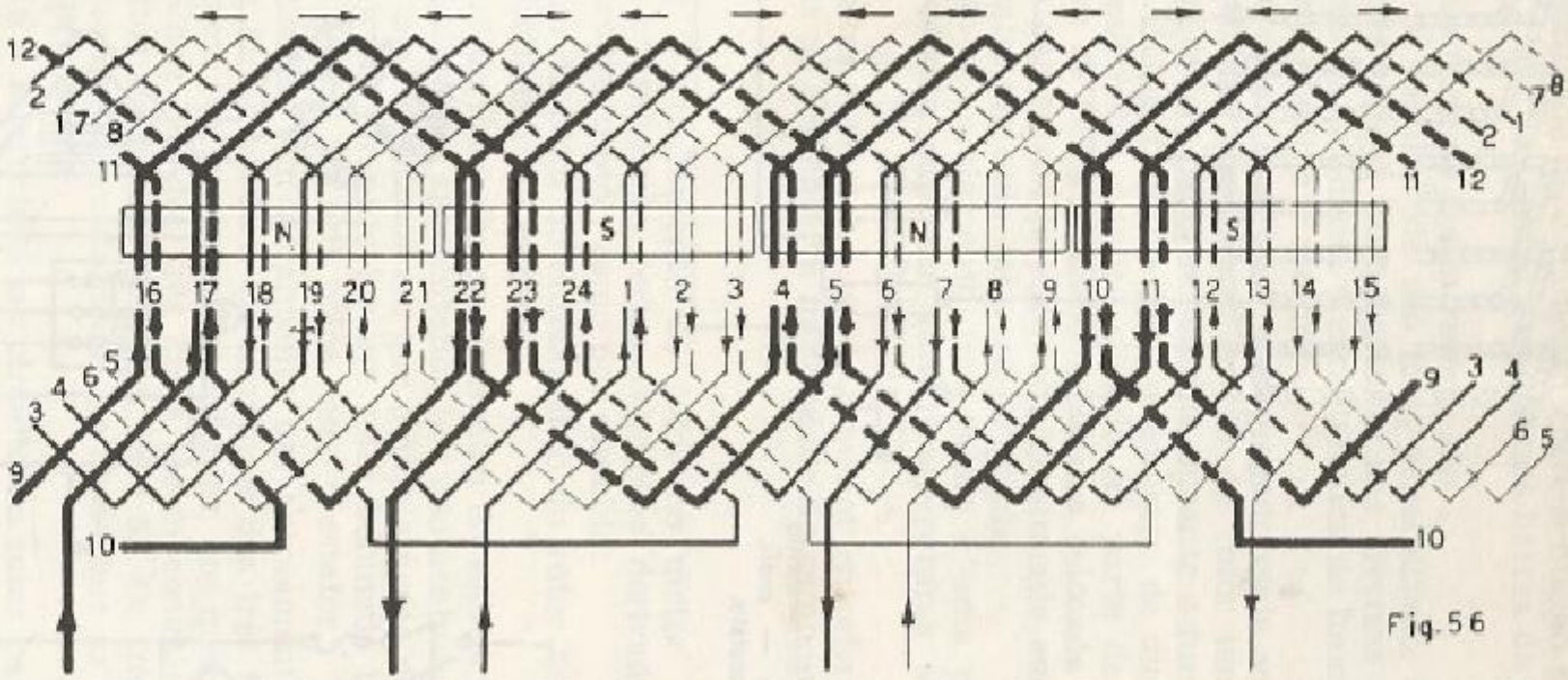


Fig. 56 — Esquema de um enrolamento ondulado, de rotor, com 4 pólos, 24 ranhuras

Pela fórmula "17" o número de ranhuras por pólo e por fase (q) é:

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{24 \text{ ranhuras}}{3 \text{ fases} \cdot 4 \text{ pólos}} = 2$$

O passo da bobina (Y) segundo a fórmula 20 será:

$$Y = \frac{Q}{p} = \frac{24 \text{ ranhuras}}{4 \text{ pólos}} = 6$$

Neste enrolamento, quando um lado de bobina se coloca na parte superior da ranhura n.º 1, o outro lado deverá colocar-se nos fundos da ranhura 7.ª. Para saber em que ranhura dever-se-á ligar o lado seguinte, teremos que somar o passo da bobina (6) à ranhura n.º 7. No esquema vê-se que o lado inferior da bobina da 7.ª ranhura é ligado ao lado superior da bobina colocada na ranhura n.º 13. A ligação seguinte far-se-á entre o lado de bobina superior da 13.ª ranhura e o inferior da 19.ª. Se à ranhura n.º 19 acrescenta-se o passo da bobina (6), obtém-se o número da 1.ª ranhura, isto é, o lado de bobina interior da ranhura 19.ª haverá que conectá-lo com o superior da 1.ª, e desta forma, o enrolamento se fecharia. Para evitar isto, ao chegar à ranhura na qual se tenha começado o enrolamento, reduz-se ou aumenta-se o passo do bobinamento em uma ranhura. Estes enrolamentos são chamados de transição reduzida, quando se reduz o passo do enrolamento, e de transição cumprida quando se aumenta o passo do bobinamento.

O esquema que estamos estudando é de transição reduzida, por isto o lado de bobina inferior da ranhura n.º 19 está ligado ao lado superior da 24.ª (passo 5 ou 1-6).

Como neste enrolamento o número de ranhuras por pólo e por fase é 2, será preciso fazer duas circundações do rotor. A segunda circundação vai junto com a primeira. O lado de bobina superior da ranhura n.º 24 é ligado com o inferior da 6.ª, esta por sua vez se conecta com o lado da bobina superior da ranhura 12.ª, e esta com inferior da 18.ª.

Para completar o enrolamento tetrapolar desta primeira fase é necessário fazer a 2.ª circundação do rotor em sentido contrário. Para isto é preciso ligar o lado de bobina inferior alojado na ranhura n.º 18 com o lado inferior que está a um passo dele, ou seja, com o da 24.ª. Esta ligação é designada como ponte de retorno.

Normalmente nos enrolamentos do tipo ondulado, a circundação dos grupos de bobinas inicia-se pelo princípio da fase no

sentido dos ponteiros do relógio, e depois da ponte, o sentido da circundação faz-se de forma inversa, isto é, contrário ao dos ponteiros do relógio.

Na segunda circundação, o lado de bobina inferior da ranhura n.º 24 liga-se com o lado superior da 18.ª, e este por sua vez conecta-se ao inferior da ranhura n.º 12, enquanto que este ligar-se-á com o superior da ranhura n.º 6. Como a ranhura 24.ª já se encontra ocupada, será necessário reduzir o passo para ligar o lado de bobina superior da ranhura n.º 6 com o lado inferior da 1.ª. A continuação liga-se o lado de bobina inferior da ranhura n.º 1 com o lado superior da 19.ª, e este conecta-se ao inferior da 13.ª, sendo que este por seu turno deverá ligar-se ao lado de bobina superior da ranhura n.º 7, donde sairá o terminal da primeira fase.

Como a segunda e terceira fases são exatamente iguais à primeira, enrolam-se da mesma forma ao explicado para a primeira fase.

A fig. 57, ilustra o esquema de um enrolamento ondulado de rotor com 4 pólos, passo fracionário 2,5 ranhuras por pólo e por fase.

O rotor bobinado embora mais caro que o de gaiola combina bem as características de alta e de baixa resistência, oferecendo melhores condições de partida, porém com piores condições de trabalho.

Dificilmente nos motores com rotor bobinado, os fios ou bornes do rotor saem pela mesma caixa de conexões que os fios ou bornes do estator, porém, quando isso acontece, sempre têm marcas nos fios do rotor que os diferenciam dos demais, pois como já foi dito, a ligação do rotor não é feita ao circuito da linha de alimentação, e a corrente que circula pelo rotor é devida exclusivamente à indução criada pelo campo magnético do estator.

A construção do rotor bobinado é limitada até uma determinada potência, por exemplo; a tensão e a corrente entre anéis não deverá ultrapassar respectivamente 2000 volts e 1500 ampères aproximadamente.

Os motores de indução de rotor bobinado utilizam-se quando se precisa de um grande momento de arranque. É também empregado em aplicações tais como: ventiladores em que se deseja ter um grande número de velocidades de serviços compreendidas entre a média e a máxima; acionamento onde a corrente de partida é limitada; regime intermitente em guinchos, elevadores, laminadores, guindastes, etc., e onde o controle da velocidade é necessário para um satisfatório manuseio da carga.

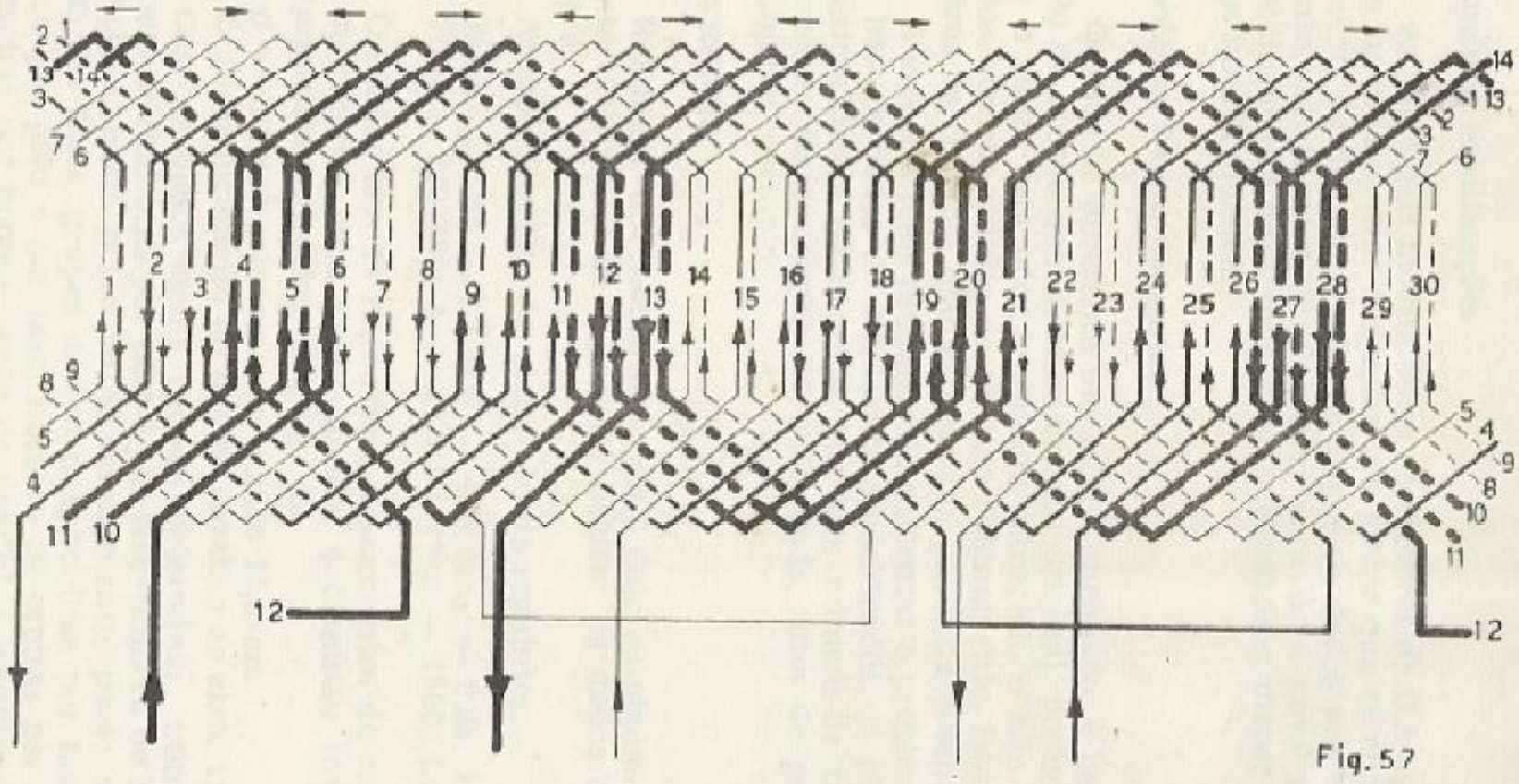


Fig .57 — Diagrama de um enrolamento de rotor, com 4 pólos, passo fracionário, 2,5 ranhuras por pólo e por fase.

Capítulo 12

MODIFICAÇÕES DOS MOTORES DE C.A.

Principais modificações

As principais modificações de motores de C.A. que se apresentam na prática são: reenrolar um motor que se encontra completamente danificado e, não se dispõe de dados precisos do bobinamento; modificar o enrolamento para uma nova tensão; alterar o bobinamento para uma nova velocidade e dispor o motor para uma nova freqüência.

Problemas de enrolamentos

Quando se apresenta um motor queimado, é bastante rebobiná-lo de acordo com o enrolamento original, porém há casos em que o motor está completamente estragado e não se dispõe dos dados técnicos obtidos do próprio bobinamento, isto é, número de espiras por bobina, diâmetro do fio, passo da bobina, etc.

A maneira mais prudente de enfrentar o problema, é tomando por base os dados do fabricante especificados na placa de características fixada na carcaça, que são: número de fases, potência, tensão, corrente, freqüência, velocidade, fator de potência e tipo de ligação, exemplo:

EXERCICIO — 4

Rebobinar um motor assíncrono cujo enrolamento está totalmente destruído e só é possível utilizar os dados da placa indicadora.

As especificações da placa são as seguintes:

Fases — 3; cv — 6,5; kW — 4,8; $\cos\varphi$ — 0,85; Hz — 50
Volts — 220/380; A — 17/9,84; rpm — 1500; Ligação — Δ/γ

O estator tem 24 ranhuras e os elementos do circuito magnético necessários para o cálculo são: o diâmetro interno "d" e o comprimento do núcleo "L", fig. 29.

d — diâmetro interno do núcleo 15,5 cm.
L = comprimento do núcleo paralelo ao eixo, 11 cm.

Com os dados acima pede-se determinar: número de pólos, número de ranhuras por pólo e por fase, número de bobinas, passo da bobina, passo polar ou do enrolamento, passo das ranhuras, passo das fases, grupos de bobinas, bobinas por fase, fluxo magnético por pólo e por fase, número de espiras por fase, número de espiras por bobina, seção do condutor, conjugado básico e o rendimento.

Número de pólos. — Desde que a rotação do motor é 1500 rpm trata-se de um motor de;

$$p = \frac{120 \cdot f}{rpm} = \frac{120 \cdot 50}{1500} = 4$$

quatro pólos.

Número de ranhuras por pólo e por fase. — Sendo 24 o número de ranhuras e 4 o número de pólos, o número de ranhuras por pólo e por fase segundo a fórmula 17 é de:

$$q = \frac{Q}{m.p} = \frac{24}{3 \cdot 4} = 2$$

duas ranhuras por cada pólo para cada fase.

Número de bobinas. — O bobinamento a ser usado é de duas camadas, onde o número de bobinas deverá ser igual ao de ranhuras. Como se trata de um núcleo com 24 ranhuras serão 24 bobinas no total (B = 24).

Passo da bobina. — Sendo um enrolamento a passo pleno, o passo de cada bobina pela fórmula 20 será:

$$Y = \frac{Q}{p} = \frac{24 \text{ ranhuras}}{4 \text{ pólos}} = 6$$

1-7, passo integral; desenvolve-se por 180° E, ou seja por todo um passo polar.

Passo polar ou do enrolamento. — O ângulo medido entre dois pólos adjacentes corresponde a meio período, isto é, a 180 °E. O passo polar obtido através da fórmula 21 onde o diâmetro do núcleo é de 15,5 cm, será de:

$$Y_1 = \frac{d \cdot \pi}{p} = \frac{15{,}5 \cdot 3{,}14}{4 \text{ pólos}}$$ — 12 cm por pólo (desprezam-se as decimais).

O espaço correspondente a cada ranhura é de:

$$\frac{15{,}5 \cdot 3{,}14}{24 \text{ ranhuras}} = 2 \text{ cm por ranhuras.}$$

O passo polar em número de ranhuras será de:

$$\frac{\text{12 cm por pólo}}{\text{2 cm por ranhura}} = 6$$

seis ranhuras.

Passo das ranhuras. — Uma vez que as ranhuras são todas igualmente espaçadas, o passo entre duas ranhuras consecutivas é o ângulo elétrico entre ranhuras adjacentes. De acordo com a fórmula 27, a 6 ranhuras correspondem 180 °E, e a uma ranhura corresponderá:

$$\alpha = \frac{180\ ^\circ E}{r_p} = \frac{180}{6} = 30\ ^\circ E$$

o passo das ranhuras é igual a 30 graus elétricos.

Passo das fases. — O passo das fases determina o ângulo ou a distância entre as ranhuras em que estão colocadas as entradas das fases do enrolamento. Neste bobinamento o ângulo característico é de 360°/3 fases = 120 °E, isto é, entre a entrada de uma certa fase e a entrada da fase subseqüente deverá haver 120° E. Na prática 120° E deve expressar-se em ranhuras porque se podem contar com maior facilidade. Pela fórmula 28 teremos que:

$$\theta_1 = \frac{120\ ^\circ E}{\alpha} = \frac{120\ ^\circ E}{30\ ^\circ E \text{ correspondentes a 1 ranhura}} = 4$$

o passo das fases é 1-5.

Assim sendo, a entrada da fase e_2 encontra-se na quinta ranhura a partir da entrada da fase e_1, fig. 39. Analogamente a entrada da fase e_3 acha-se na quinta ranhura a partir de e_2 e assim sucessivamente, acontecendo o mesmo para com as saídas das fases.

Grupos de bobinas. — O número de grupos de bobinas é determinado pela fórmula 29 que dará:

$$G_p = m.p = 3 \text{ fases} \cdot 4 \text{ pólos} = 12$$

no total doze grupos de bobinas.

Bobinas por grupo. — Segundo a fórmula 30 será de:

$$B_g = \frac{B_t}{G_p} = \frac{24 \text{ bobinas}}{12 \text{ grupos}} = 2$$

duas bobinas por grupo.

Bobinas por fase. — Como o motor tem um total de 24 bobinas, o número de bobinas por fase segundo a fórmula 31 será de:

$$B_f = \frac{Q}{m} - \frac{24 \text{ ranhuras}}{3 \text{ fases}} = 8$$

oito bobinas por fase.

Cálculo da corrente. — Para calcular a corrente consumida pelo motor reenrolado as fórmulas aplicadas serão:

$$VA = \frac{W}{\cos \varphi} \qquad (33)$$

$$I = \frac{VA}{\sqrt{3} \cdot V} \qquad (34)$$

onde:

VA = potência em volt-ampères.
W = potência em watts.
cos φ = fator de potência.
I = corrente em ampères.
V = volts.

Potência total absorvida da rede pelo motor:

$$P_t = \sqrt{3} \cdot VI \cos\varphi \; . = 1{,}73 \; . \; 220 \; . \; 17 \; . \; 0{,}85 = 5500 \text{ watts.}$$

$$VA = \frac{W}{\cos \varphi} = \frac{5500}{0{,}85} = 6470 \text{ volt-ampères.}$$

Ligação em triangulo. — Para a tensão de 220 volts utiliza-se a conexão em triângulo, onde os enrolamentos das três fases formam um circuito fechado. Nesta ligação a tensão de linha é igual à tensão de fase. A corrente de linha é igual ao produto da corrente na fase por 1,73. A corrente que consome o motor na ligação triângulo é de:

$$I = \frac{6470}{1{,}73 \; . \; 220} = 17 \text{ A}$$

Ligação em estrela. — Para uma tensão de linha a 380 volts emprega-se a ligação estrela porque o valor da tensão entre duas linhas quaisquer da rede de alimentação é igual ao produto de qualquer tensão de fase por 1,73. A corrente em qualquer fase e igual à corrente de linha já que os enrolamentos formam um caminho único para o fluxo de corrente entre fases. A corrente consumida para a conexão estrela será de:

$$I = \frac{6470}{1{,}73 \;.\; 380} = 9{,}84 \text{ A}$$

As conexões do bobinamento estão representadas nas figs. 39 e 40. A fig. 58, mostra o diagrama da caixa de ligações com o princípio e fim de cada fase para possibilitar com facilidade e rapidez a troca de ligações de acordo com o diagrama de conexões das figs. 59 e 60.

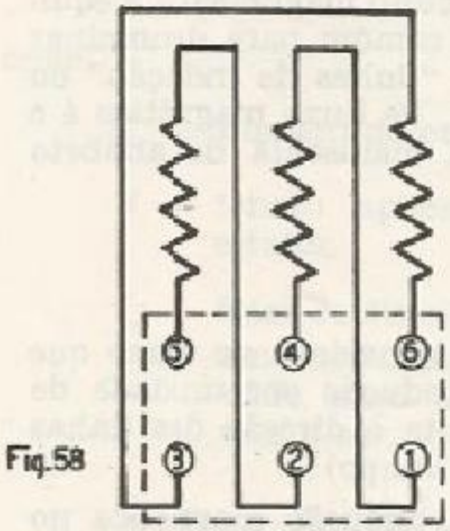


Fig. 58 — Caixa de ligações.

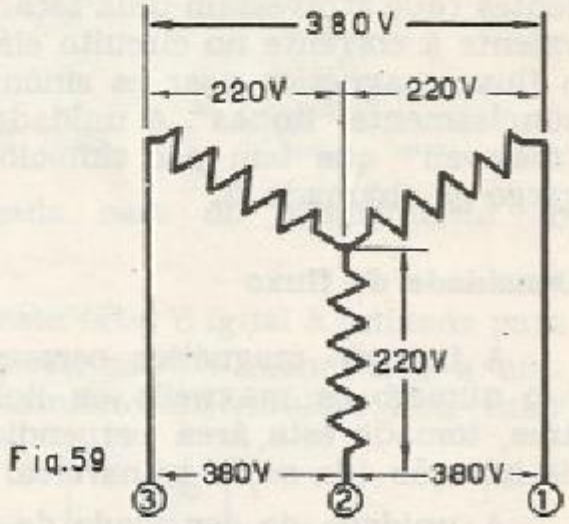


Fig. 59 — Enrolamento ligado em estrela com indicação da tensão em cada fase.

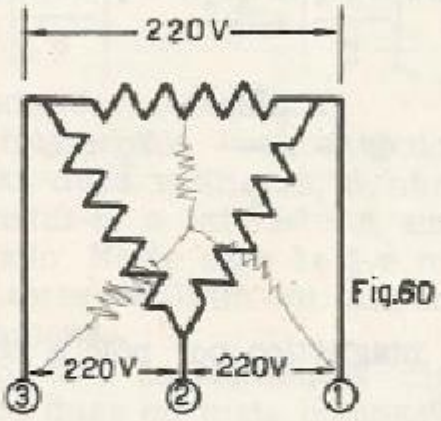


Fig. 60 — Bobinamento em conexão triângulo indicando a tensão de cada fase.

O consúmo de corrente deste motor será para a conexão triângulo 17 ampères e para a ligação estrela 9,84 A. Vê-se que com a mesma potência o motor toma para cada fase de 380 volts 1,73 vezes menos corrente que para a tensão de 220 volts, porque esta é 1,73 vezes menor que os 380 volts, isto é, a relação da corrente é de 1: 1,73.

O rotor serve tanto para os 220 volts como para os 380 volts porque a corrente que circulará por seu bobinado é aproximadamente a mesma, já que ao calcular a densidade de corrente no estator vimos que os VA são os mesmos para ambas as tensões.

CALCULO DO FLUXO MAGNÉTICO POR PÓLO E POR FASE

Fluxo magnético

Fluxo magnético é o número total de linhas de indução existentes (que atravessam uma seção) no circuito magnético e é equivalente à corrente no circuito elétrico. É comum para denominar o fluxo magnético usar os sinônimos de "linhas de indução" ou simplesmente "linhas". A unidade C.G.S. de fluxo magnético é o "maxwell" que tem por símbolo a letra maiúscula do alfabeto grego Φ, chamada fi.

Densidade de fluxo

A indução magnética corresponde à densidade de fluxo que é o número de maxwells ou linhas de indução por unidade de área, tomada esta área perpendicularmente à direção das linhas de indução (da seção transversal de um campo).

A unidade de densidade de fluxo ou indução magnética no sistema C.G.S. tem o nome de "gauss" e por símbolo a letra maiúscula do alfabeto grego β, que se chama beta.

O fluxo magnético por pólo e por fase é obtido por meio da seguinte fórmula:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot Y_p \cdot L \cdot \beta \qquad (35)$$

onde;

Φ = fluxo magnético por pólo e por fase.

π = 3,1416

Y_p = passo polar de acordo com a fórmula 21, é igual a 12 cm.

L = Comprimento útil do núcleo medido paralelamente ao eixo.11 cm.

β — induçao magnética no entreferro em linhas por cm², varia de 3000 a 6000; adota-se o valor de 4500.

$$\Phi = 0{,}636 \cdot 12 \cdot 11 \cdot 4500 = 378000$$

o fluxo magnético por pólo e por fase é de 378000 linhas.

CALCULO DO NÚMERO DE ESPIRAS POR FASE

Determina-se o número de espiras por fase de acordo com a seguinte equação:

$$N_e = \frac{V \cdot f_d \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot f_e \cdot \Phi \cdot f} \qquad (36)$$

onde;

N_e — número de espiras por fase.

V — tensão aplicada a cada base do bobinamento do estator.

f_d — fator de distribuição. Este fator é igual à unidade para um enrolamento "concentrado" e menor que a unidade para um bobinamento distribuido. Seu valor vem a ser:

$$f_d = \frac{\text{sen}\left(q\frac{\alpha}{2}\right)}{q\ \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\text{sen}\left(2 \cdot \frac{30^\circ}{2}\right)}{2\ \text{sen}\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = \frac{0{,}5}{0{,}517} = 0{,}97$$

0,97 arredondando as decimais.

Nos enrolamentos "concentrados" cada grupo ocupa apenas duas ranhuras, o número de bobinas por grupo reduz-se a um, isto é, uma ranhura por fase e por pólo. Neste caso as f.e.m. induzidas nos vários condutores resultam em fase entre si e somam-se aritmeticamente.

No caso dos enrolamentos distribuídos, cada grupo contém duas ou mais bobinas que ocupam várias ranhuras por fase e por pólo. Como duas ranhuras sucessivas estão distanciadas de um ângulo mecânico, as f.e.m. induzidas nas bobinas do mesmo

grupo não estão em fase, e a f.e.m. é menor do que seria se fosse concentrado. Sendo "α" o ângulo elétrico entre duas ranhuras sucessivas, a f.e.m. resultante é determinada por meio de uma soma vectorial das f.e.m. do número de lados de bobinas (ou número de ranhuras por pólo e por fase — "q" —) como indicado pela fórmula acima.

A f.e.m. de um enrolamento distribuído obtém-se: multiplicando o "fator de distribuição" pela f.e.m. de um bobinamento "concentrado" do mesmo número de espiras, e com fio da mesma seção.

10^8 — é a abreviatura de 100.000.000, constante utilizada para passar a volts as unidades C.G.S. Intervém esta quantidade no cálculo porque quando se cortam cem milhões de linhas de força num segundo a f.e.m. é de um volt.

4,44 — constante de equivalência entre o valor máximo e o valor eficaz da corrente alternada e o número π (pi) — 3,1416, proveniente da "pulsação", simplificada de acordo com a fórmula:

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2}} = \frac{6,2832}{1,4142} = 4,44; \quad \text{ou}$$

$$\pi \cdot \sqrt{2} = 3,1416 \cdot 1,4142 = 4,44$$

este fator corresponde a 4 vezes o fator de forma 1,11 para a senóide, onde $\frac{\pi}{2} : \sqrt{2} = 1,11$.

Pulsação ou freqüência angular é a velocidade angular do período, é expressa em radianos elétricos por segundo e tem por símbolo a letra minúscula do alfabeto grego ω, chamada ômega, é igual a $\omega = 2\pi f$.

f_e = fator de passo ou fator de enrolamento que depende do passo das bobinas. Seu valor equivale ao seno da "metade do ângulo do vão da bobina"

$$\left(\frac{180}{2} = 90; \text{ sen } 90^\circ = 1 \right),$$

por exemplo: num enrolamento de passo pleno este ângulo é de 180 ºE e, num bobinamento de 5/6 do passo integral, o ângulo de lado a lado de bobina vem a ser; 5/6 de 180 = 150º E.

O fator de passo, ou fator de corda, é a constante pela qual a f.e.m. de uma bobina ou de um enrolamento de passo pleno precisa ser multiplicada para dar o valor da f.e.m. de uma bobina ou um enrolamento de passo curto.

Φ = fluxo magnético em maxwells.

f = freqüência em Hz.

$$N_e = \frac{220 \cdot 0{,}97 \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot 1 \cdot 378000 \cdot 50} = 256 \text{ (desprezam-se as decimais)}$$

256 espiras por fase.

Espiras por bobina. — O motor tem um total de 24 bobinas, ou seja 8 bobinas por fase. Estas 8 bobinas de cada fase são ligadas em série, logo de acordo com o item anterior, o número de espiras por bobina é:

$$\frac{256 \text{ espiras por fase}}{8 \text{ bobinas por fase}} = 32$$

de 32 espiras.

CÁLCULO DA SEÇÃO DO CONDUTOR

A seção do condutor determina-se depois de se ter fixado o valor da densidade da corrente. A escolha da densidade da corrente deve ser feita levando-se em consideração o bom funcionamento do motor.

Os valores aproximados da densidade de corrente estão situados entre 2 e 6 A/mm². O valor menor corresponde aos motores de baixa rotação ou mal ventilados e o maior é usado nos motores de maior rotação, porque quanto maior for a velocidade periférica do rotor tanto mais eficiente é a ventilação e por tanto a refrigeração.

Estabelece-se para a densidade de corrente o valor de 5 A/mm². A fórmula para o cálculo da seção do condutor é a seguinte:

$$S = \frac{I}{\delta} \qquad (37)$$

onde;

S = seção do condutor em mm².

I = corrente em ampères.

δ = delta, letra minúscula do alfabeto grego que expressa densidade da corrente em A/mm².

O valor mais alto da corrente absorvida é com a conexão em triângulo que é de 17 A, e admitindo uma densidade de corrente de 5 A/mm² a seção do condutor será:

$$S = \frac{17}{5} = 3{,}4$$

de 3,4 mm².

Verificação do cálculo.

Após o cálculo, deve-se verificar se os condutores calculados mais o isolamento cabem nas ranhuras disponíveis do estator sem deixar folga, o que significa que o enrolamento cálculado está bom e depois de enrolado ficará como mostra a fig. 28.

Poderá acontecer também que: a) os condutores mais isolamento deixem folga relativamente grande nas ranhuras; b) os condutores mais isolamento não caibam nas ranhuras.

Nestes dois casos torna-se necessário refazer o cálculo, modificando os valores das constantes admitidas.

CALCULO DO CONJUGADO BÁSICO

Para a seleção correta do tipo de motor, é necessário estabelecer uma correlação entre a carga da máquina a ser acionada na partida, (nas condições de serviço) com o motor mais adequado, no que se refere ao conjunto e à velocidade.

Os motores fornecem determinada potência (medida em cv), a uma dada rotação. Poder-se-ia também dizer que fornecem determinado conjugado. Um motor de 5 cv a 875 rpm está fornecendo conjugado igual a um motor de 10 cv a 1750 rpm. Por isso são também do mesmo tamanho aproximadamente.

As curvas do diagrama da fig. 61, relacionam o conjugado com velocidade do motor.

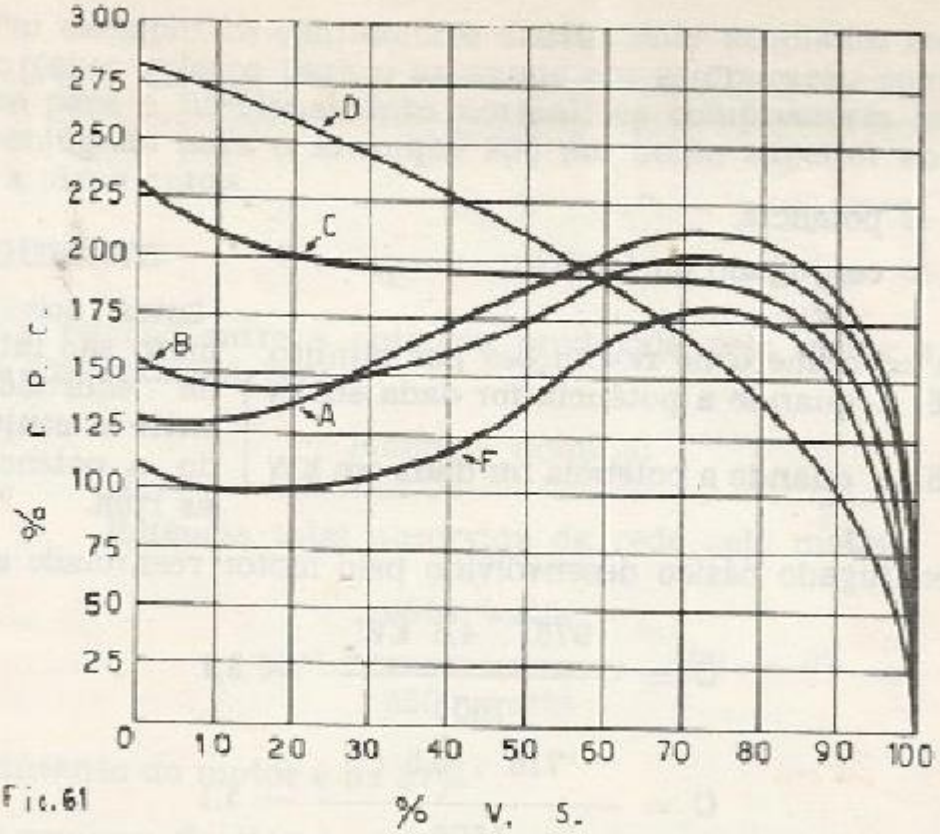


Fig. 61

Fig. 61 — Curvas típicas de conjugado-velocidade.
% C.P.C. — % do conjugado de plena carga.
% V.S. — % velocidade síncrona.

A, B, C, D, F, categorias fixados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Conjugado.

Corjugado substitui a palavra tradicional torque. Pode ser definidc como esforço de torção ou simplesmente: é o momento de rotação de uma força em torno de um eixo fixo, desde uma distância determinada.

Em um motor de indução o conjugado máximo representa o esforço de torção que o motor pode desenvolver quando em velocidade máxima.

Conjugado básico.

É o conjugado em função da potência nominal e velocidade síncrona sob tensão e freqüência nominais. É deduzido da seguinte fórmula

$$P = \frac{C \cdot n \cdot 2\pi}{4500} = \frac{C \cdot n}{716}$$

$$C = \frac{716 \cdot P}{n} \qquad (38)$$

$$C = \frac{975 \cdot P}{n} \qquad (39)$$

onde;

P = potencia.

C = conjugado ou binário.

n = número de revoluções por minuto.
716 = quando a potência for dada em cv
975 = quando a potencia for dada em kW

Estes dois número são fatores de equivalência entre o conjugado, a potência e as rpm.

C conjugado básico desenvolvido pelo motor reenrolado será:

$$C = \frac{975 \cdot 4{,}8 \text{ kW}}{1500} - 3{,}1$$

$$C = \frac{716 \cdot 6{,}5 \text{ cv}}{1500} - 3{,}1$$

de 3,1 kgm.

A potência máxima determina o conjugado máximo requerido pela carga (máquina acionada). O conjugado exigido pela máquina ou pelo aparelho com carga normal não é o único a considerar, pois tanto o conjugado estático quanto o conjugado máximo desempenham papel importante.

Conjugado estático

Entende-se por conjugado estático o esforço de rotação necessário para o arranque, a fim de evitar um eventual bloqueio.

Conjugado máximo

Conjugado máximo é o esforço de rotação que um motor pode exercer sob tensão e freqüência nominais sem redução brusca da velocidade.

Conjugado com rotor bloqueado

É o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor em repouso, para qualquer posição angular do rotor, sob tensão e freqüência nominais.

Conjugado de arranque

É o conjugado que o motor deve desenvolver para arrancar a carga do repouso para o estado de movimento.

Por exemplo, os ventiladores diretamente acoplados requerem muito pouco esforço para o arranque em comparação com o que exigem para o funcionamento normal; os compressores precisam um conjugado para o arranque 200 por cento superior ao conjugado a plena carga.

RENDIMENTO

É a relação entre a potência produzida pelo motor e a potência absorvida da rede:

$$\eta = \frac{\text{Potência nominal}}{\text{Potência total absorvida da rede pelo motor}} \cdot 100;$$

$$\eta = \frac{4800 \text{ watts}}{5500 \text{ watts}} \cdot 100 = 87$$

o rendimento do motor é de 87%

O esquema do cálculo deste enrolamento é o da fig. 39.

MODIFICAÇÃO DE MOTORES PARA NOVA TENSÃO

Normalmente os motores assíncronos se fabricam para trabalhar com uma ou com duas tensões, sendo estas indicadas na placa de características do motor, exemplo: 127/220 volts, 220/380 380/630 volts, 440/760 volts, 500 volts, 2300 volts, etc.

Quando o motor está previsto para duas tensões levam-se até a caixa de ligações os seis terminais das três fases. Assim sendo, se o motor é projetado, por exemplo, para 220/380 volts dever-se-á ligar em triângulo quando a linha de alimentação seja de 220 volts e em estrela se a rede de alimentação é de 380 volts.

Quando o motor passa a operar da tensão inferior para a tensão superior ou da maior tensão para a menor, a corrente adquire valores sempre inversamente proporcionais a tensão.

Nos motores ligados em triângulo o enrolamento de cada fase tem a mesma tensão que a rede de alimentação, enquanto que a corrente em cada fase do bobinamento do motor é menor que a corrente da rede.

Calcula-se a corrente de cada fase do enrolamento da ligação em triângulo segundo a seguinte equação:

$$\text{Corrente de fase} = \frac{\text{Corrente da rede}}{\sqrt{3}} \qquad (40)$$

Para os motores ligados em estrela, o bobinamento de cada fase do estator tem a mesma corrente que a linha de alimentação e a tensão em cada fase do enrolamento do motor é menor que a tensão da rede.

Obtém-se a tensão em cada fase do bobinamento da conexão em ligação estrela através da seguinte fórmula:

$$\text{Tensão da fase} = \frac{\text{Tensão da rede}}{\sqrt{3}} \qquad (41)$$

Pela explicação acima deduz-se que embora o motor possa trabalhar com duas tensões diferentes na linha de alimentação, em ambos os casos se distribui uma mesma tensão para cada fase do motor, figs. 59 e 60.

Na transformação e modificação dos motores de indução deve-se manter dentro do possível o mesmo fluxo magnético por pólo e por fase, não sendo conveniente modificar a quantidade de linhas para mais ou para menos de 10% do fluxo primitivo, para não alterar fundamentalmente as características e a saturação magnética do motor.

EXERCÍCIO — 5

Considere-se um motor que se encontra ligado em triângulo a uma linha de 220 volts e se quer ligar a uma rede de alimentação de 380 volts. O motor tem o rotor em curto-circuito e sua partida é dada através de um autotransformador.

Neste caso não é necessário reenrolar o estator, é suficiente desfazer a ligação em triângulo, figs. 60 e 62, e ligar as três fases em estrela, aplicando nesta última ligação os 380 volts da linha de alimentação. Os enrolamentos de cada fase receberão outra vez 220 volts como na antiga conexão triângulo, ficando ligados segundo está indicado nas figs. 59 e 63.

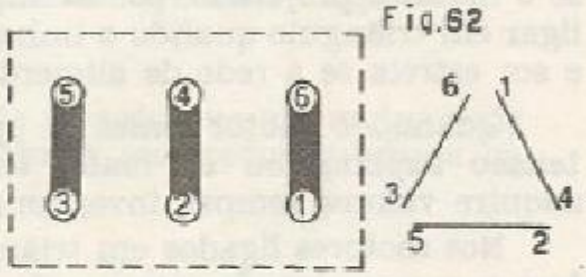


Fig. 62 — Quadro de bornes, ligação triângulo.

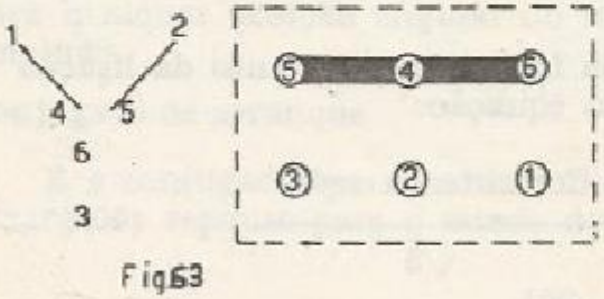


Fig. 63 — Caixa de bornes, ligação estrela.

O rotor também não precisa ser modificado porque seu enrolamento serve para ambas tensões. Os volt-ampères em 380 volts são aproximadamente iguais que os consumidos para a tensão de 220 volts, de acordo com as explicações dadas no capítulo anterior.

O autotransformador empregado na partida do motor tem que ser reenrolado para ser adaptado aos 380 volts. Em cada fase do autotransformador tem-se que aplicar 380/220 = 1,73 vezes mais espiras e com uma seção 1,73 vezes menor que tinha para o serviço em 220 volts.

Os relés térmicos, fusíveis, etc., devem ser reajustados para uma densidade de corrente 1,73 vezes menor, como resultado do aumento de tensão que foi acrescida na mesma proporção ao passar de 220 para 380 volts.

EXERCÍCIO — 6

Dispõe-se de um motor trifásico para 220 volts ligado em estrela. A linha de alimentação local é de 380 volts e é necessário o emprego deste motor. Suas características são:

220 Volts, 4 cv, $\eta = 0{,}8$, 1500 rpm, 50 Hz, $\cos \varphi = 0{,}85$

A diferença deste caso com o do motor anterior consiste em que aquele estava ligado em triângulo e este está em estrela.

Na ligação estrela o enrolamento de cada fase do estator recebe 220/1,73 — 127 volts. Vê-se que não é possível por meio de uma simples modificação de ligações adaptar este motor para os 380 volts como foi feito no caso anterior.

Neste caso é necessário reenrolar o estator.

A potência elétrica total consumida da rede será: de acordo com a seguinte fórmula:

$$P_t = \frac{P}{\eta} \qquad (42)$$

$$P_t = \frac{\text{Potência nominal}}{\text{Rendimento}} = \frac{4 \text{ cv}}{0{,}8} = 5$$

é de 5 cv.

Como a potência é dada em cv, basta multiplicar o número de cv por 736, para obter a potência em watts.

Se a potência for dada em kW, multiplica-se por 1,36, resultando a potência em cv (cavalos-vapor) assim:

$$W = \text{cv} \cdot 736 \qquad (43)$$

$$\text{cv} = \text{kW} \cdot 1{,}36 \qquad (44)$$

$$W = 5 \cdot 736 = 3.680 \text{ W}$$

o motor absorve da linha de alimentação uma potência de 3680 watts.

A corrente é determinada de acordo com a seguinte fórmula:

$$I = \frac{W}{V \cdot 1{,}73 \cdot \cos\varphi} \qquad (45)$$

onde

I = corrente em ampères.
W = watts.
V = volts.
$\cos\varphi$ = fator de potência.

$$I = \frac{3680}{220 \cdot 1{,}73 \cdot 0{,}85} = 11{,}37$$

é de 11,37 ampères.

A seção do condutor admitindo uma densidade de corrente de 5 A/mm², segundo a fórmula 37, será:

$$S = \frac{11{,}37}{5} = 2{,}274$$

de 2,274 mm².

O núcleo do estator deste motor é de 36 ranhuras e o enrolamento de duas camadas.

Como o bobinamento do motor é de duas camadas o número de bobinas será igual ao de ranhuras. Tem-se então 36 bobinas no total, ou seja, 12 bobinas por fase. Na ligação para 220 volts estas 12 bobinas trabalham em série e têm 120 espiras, sendo o número de espiras por bobina de: 120/12 = 10 espiras por bobina.

Pela fórmula 36 determina-se o número de espiras por fase para a tensão de 380 volts. Com a tensão de 220 volts em ligação estrela cada fase do enrolamento suporta 127 volts. Num novo serviço de 380 volts, cada fase deverá suportar 220 volts.

Escreve-se a fórmula 36 (espiras por fase) duas vezes; uma vez para a tensão de 220 volts e a outra para a tensão de 380 volts. Dividindo-se entre si estas duas equações obter-se-á o número de espiras correspondentes a cada fase do estator para a nova tensão dos 380 volts.

Como o que vai ser modificado é apenas a tensão, mantendo-se o mesmo fluxo Φ, a mesma freqüência, a mesma velocidade e as mesmas constantes, então a fórmula 36 apresenta-se sob forma mais simplificada, assim:

$$N_e = \frac{V \cdot 0{,}97}{4{,}44} \cdot \text{Constantes}$$

após de se fazer todas as deduções e diminuir os valores iguais ter-se-á:

$$\frac{120 \text{ espiras}}{N_e} = \frac{220 \text{ volts}}{380 \text{ volts}}$$

$$N_e = \frac{380}{220} \cdot 120 = 1{,}73 \cdot 120 = 208 \text{ (arredondando as decimais)}$$

208 espiras por fase.

Logo o número de espiras por bobina para a tensão de 380 volts de acordo com os itens anteriores será de: 208/12 — 17,33; praticamente 18 espiras por bobina.

Para se manter a mesma potência do motor é necessário diminuir a seção do condutor na mesma proporção que se aumente o número de espiras.

Como a tensão aumentou 380/220 = 1,73 vezes, a diminuição da seção do condutor (2,27 mm²) também deverá ser de 1,73 vezes: S — 2,27/1,73 = 1,32 mm² será a nova seção do condutor.

Como a corrente também diminui na mesma proporção que aumenta a voltagem, a potência do motor rebobinado não sofrerá nenhuma alteração segundo fica demonstrado a seguir:

Para a tensão de 220 volts;

$$W = 220 \cdot 11{,}73 \cdot 1{,}73 \cdot 0{,}85 = 3680 \text{ watts.}$$

$$cv = kW \cdot 1{,}36 = 3{,}680 \cdot 1{,}36 = 5$$

a potência total é de 5 cv.

Para a tensão de 380 volts a corrente é;

$$I = \frac{3680}{380 \cdot 1{,}73 \cdot 0{,}85} = 6{,}6$$

de 6,6 ampères e a potência:

$$W = 380 \cdot 6{,}6 \cdot 1{,}73 \cdot 0{,}85 = 3680 \text{ watts}$$

que adquire o valor de cv, expresso por:

$$cv = \frac{W}{736} \qquad (46)$$

$$cv = \frac{3680}{736} = 5$$

potência total de 5 cv.

Resumo: São as seguintes as características do enrolamento calculado; tensão 380 volts, corrente 6,6 ampères, número de bobinas 36, número de bobinas por fase 12, número de grupos 12, número de espiras por fase 208, passo das bobinas 1-9, bobinas com 18 espiras e fio 1,32 mm² de seção.

O esquema deste bobinamento é o da fig. 64. Como se observa, emprega-se passo parcial, se fosse integral então o passo seria 1-10.

MODIFICAÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS DOS MOTORES DE C.A.

Segundo a fórmula 9 (rpm = 120 . f/n.º de pólos), esta fórmula é exata para motores síncronos e aproximada para motores assíncronos em face do escorregamento destes. A velocidade dos motores de C.A. é determinada pela freqüência da rede de alimentação e pela quantidade dos pólos do motor, portanto se conservarmos a mesma freqüência, quanto maior for o número de pólos menor será a rotação do motor, ou inversamente, quanto menor o número de pólos maior a rotação.

Alterações da velocidade.

A possibilidade de alterações da velocidade tem certos limites e deve ser levado em consideração que a velocidade de um motor não se deve aumentar ou diminuir demasiado porque além dos limites impostos pelas condições elétricas e magnéticas do motor, deve-se ter em conta também os rolamentos ao aumentar o número de rotações. A vida do rolamento diminui com o aumento da rotação. (N. do R.).

Todas as mudanças de funcionamento, tanto se refiram a potência, tensão, número de fases, freqüência ou pólos podem ser consideradas como reduzidas a mudança da voltagem. Um motor de indução pode ser considerado como um transformador, no sentido de que o número de espiras no enrolamento deve variar na mesma proporção e da mesma maneira que varia a tensão aplicada. A potência do motor varia diretamente com o quadrado da tensão. O número de ranhuras tanto no estator como no rotor aumenta com o número de pólos. Quando se aumenta o número de pólos a superfície de um pólo diminui proporcionalmente. Quanto maior

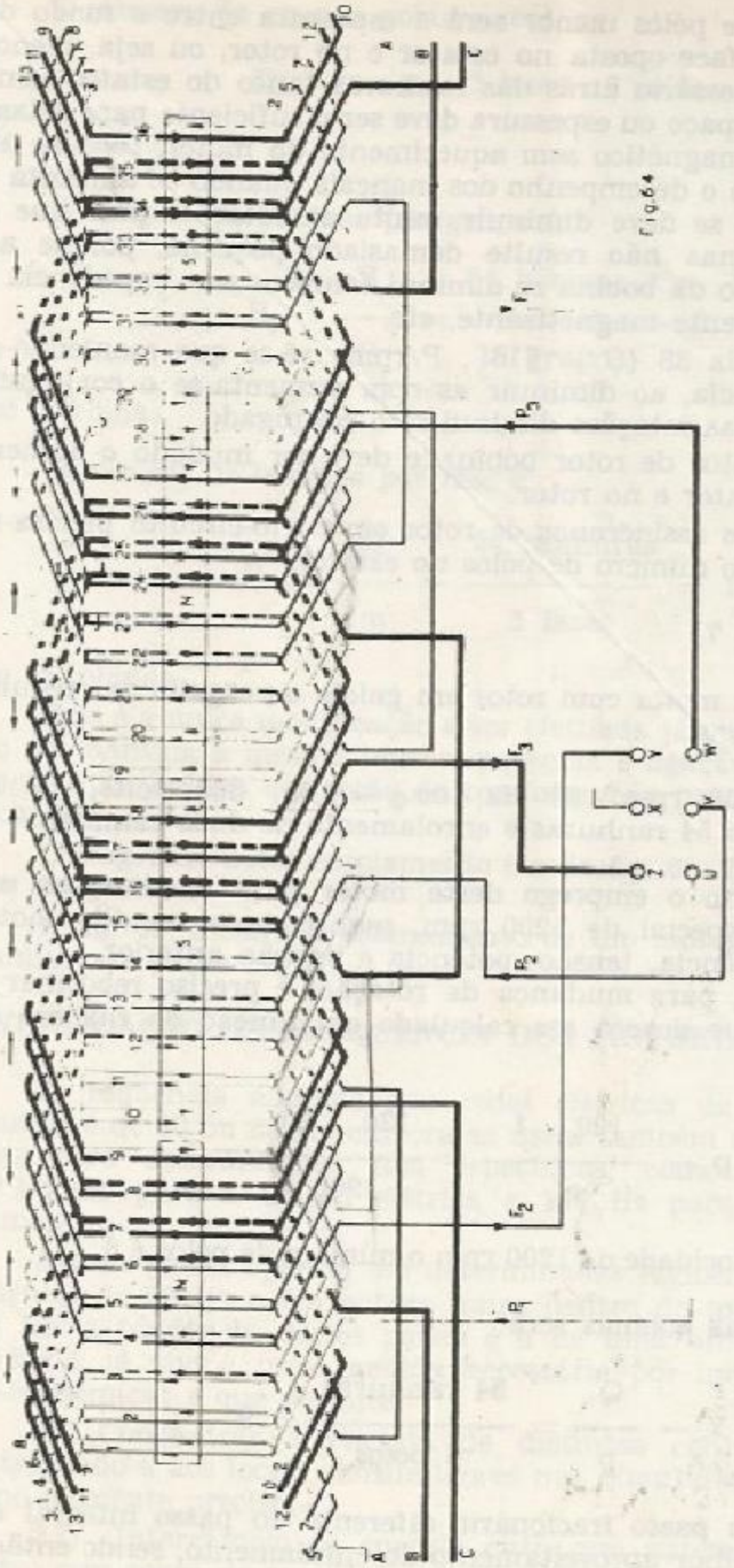


Fig. 64 — Enrolamento do estator de um motor de 4 pólos.

for o número de pólos menor será a espessura entre o fundo da ranhura e sua face oposta no estator e no rotor, ou seja, menor será o ferro necessário atrás das ranhuras tanto do estator como do rotor. Este espaço ou espessura deve ser o suficiente para deixar passar o fluxo magnético sem aquecimento do motor. Deve-se ter em consideração o desempenho dos mancais quando se aumenta a velocidade. Não se deve diminuir muito as rotações para que o passo das bobinas não resulte demasiado pequeno, porque ao diminuir o passo da bobina se diminui também sua impedância e aumenta a corrente magnetizante, etc.

Pela fórmula 38 (C = 716 . P/rpm) vê-se que mantendo-se a mesma potência, ao diminuir as rpm aumenta-se o conjugado e ao aumentar as rotações diminui-se o conjugado.

Em um motor de rotor bobinado deve ser mudado o número de pólos no estator e no rotor.

Nos motores assíncronos de rotor em curto-circuito precisa-se alterar apenas o número de pólos no estator.

EXERCICIO — 7

Tem-se um motor com rotor em gaiola de esquilo das seguintes características:

10 cv; 1800 rpm; 60 Hz; $\cos\varphi = 0{,}85$; 380 volts; 15 A; estator com 54 ranhuras e enrolamento de duas camadas.

É necessário o emprego deste motor para movimentar um equipamento especial de 1200 rpm, mantendo-se no dito motor a mesma freqüência, tensão, potência e ligação anterior.

Neste caso, para mudança de rotação, é preciso rebobinar o enrolamento que deverá ser calculado em função do número de pólos:

$$p = \frac{120 \cdot f}{n} = \frac{120 \cdot 60}{1200} = 6$$

para a nova velocidade de 1200 rpm o número de pólos é 6.

O passo das bobinas será:

$$Y = \frac{Q}{p} = \frac{54 \text{ ranhuras}}{6 \text{ pólos}} = 9$$

emprega-se um passo fracionário diferente do passo integral em —2, para o melhor aproveitamento do enrolamento, sendo então o passo 1-8.

O número de grupos polares será de:

$$G_p = m \cdot p = 3 \text{ fases} \cdot 6 \text{ pólos} = 18$$

18 grupos.

O número de bobinas por grupo é:

$$B_g = \frac{B_t}{G_p} = \frac{54 \text{ bobinas}}{18 \text{ grupos}} = 3$$

de 3 bobinas.

O número de bobinas por fase é:

$$B_f = \frac{Q}{m} = \frac{54 \text{ ranhuras}}{3 \text{ fases}} = 18$$

de 18 bobinas.

Esta é a única modificação a ser efetuada já que como foi dito, ao ser mantida a mesma tensão, potência e ligação, o número de espiras por bobina e a seção do condutor não precisam ser modificados.

O diagrama deste enrolamento é o da fig. 65. Tem dois circuitos em paralelo.

A fig 66, mostra o bobinamento de um motor de 6 pólos, 36 ranhuras e passo 1-6.

MODIFICAÇÃO DA FREQUÊNCIA DOS MOTORES DE C.A.

A freqüência adotada nas redes elétricas de quase todo o mundo é de 50 ou 60 Hz embora se usem também outras freqüências para determinados fins específicos, como por exemplo, 12 1/2 Hz para a tração elétrica e 180 Hz para máquinas-ferramentas.

Alguns países operam em determinadas regiões com uma freqüência de 50 Hz e em outras zonas dentro do mesmo país com 60 Hz. A tendência destes países é a de uma unificação de freqüência, já que é uma medida necessária por imposições técnico-econômicas e que permite:

1.º) Concentrar a energia de distintas centrais geradoras entregando-a aos locais consumidores nas quantidades necessárias e no momento preciso;

2.º) Intercâmbio de energia entre um sistema em deficit e outro com sobra de energia, sem necessidade das estações conver-

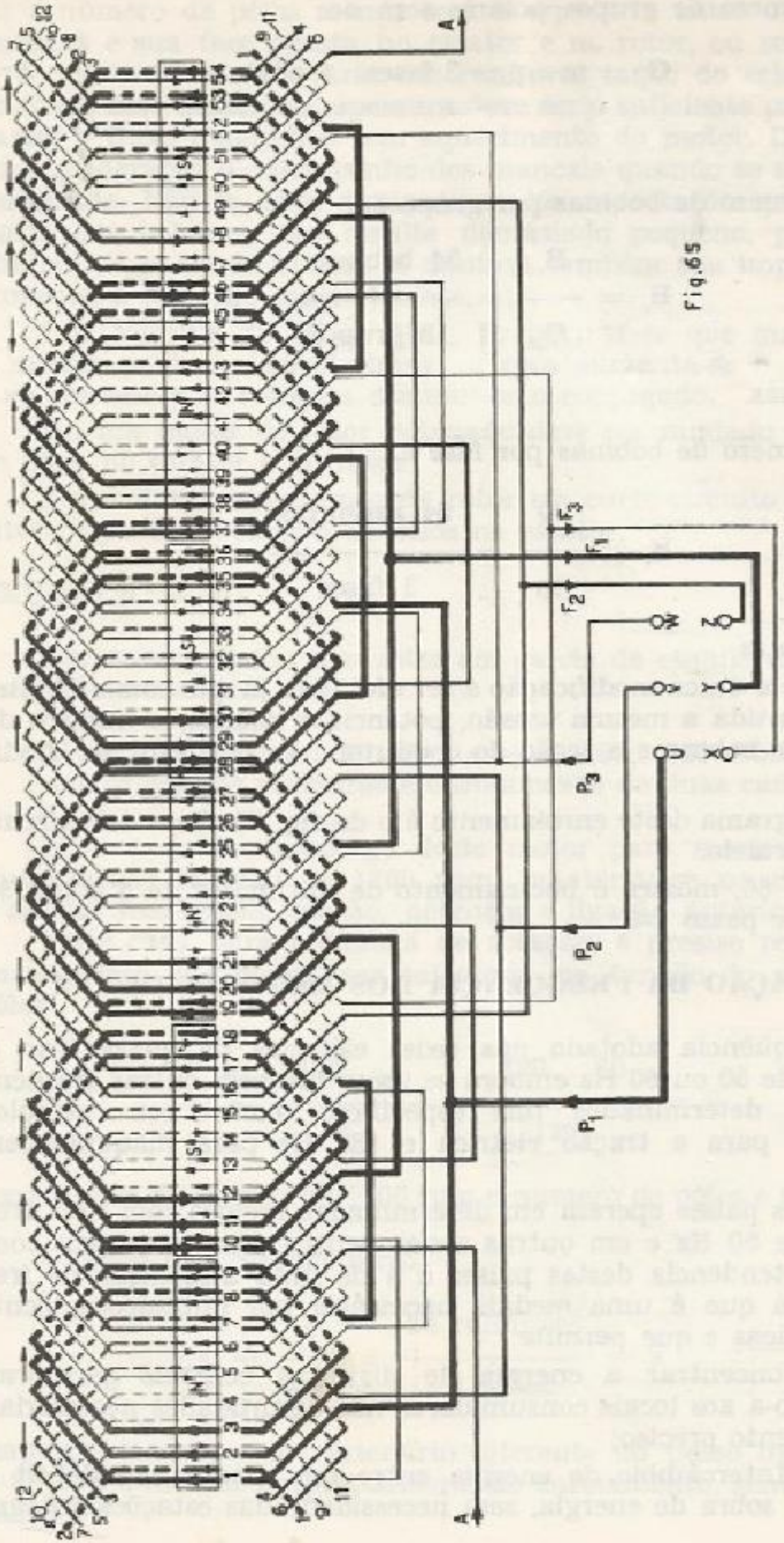


Fig. 65 — Bobinamento de um motor de 6 pólos com dois circuitos em paralelo.

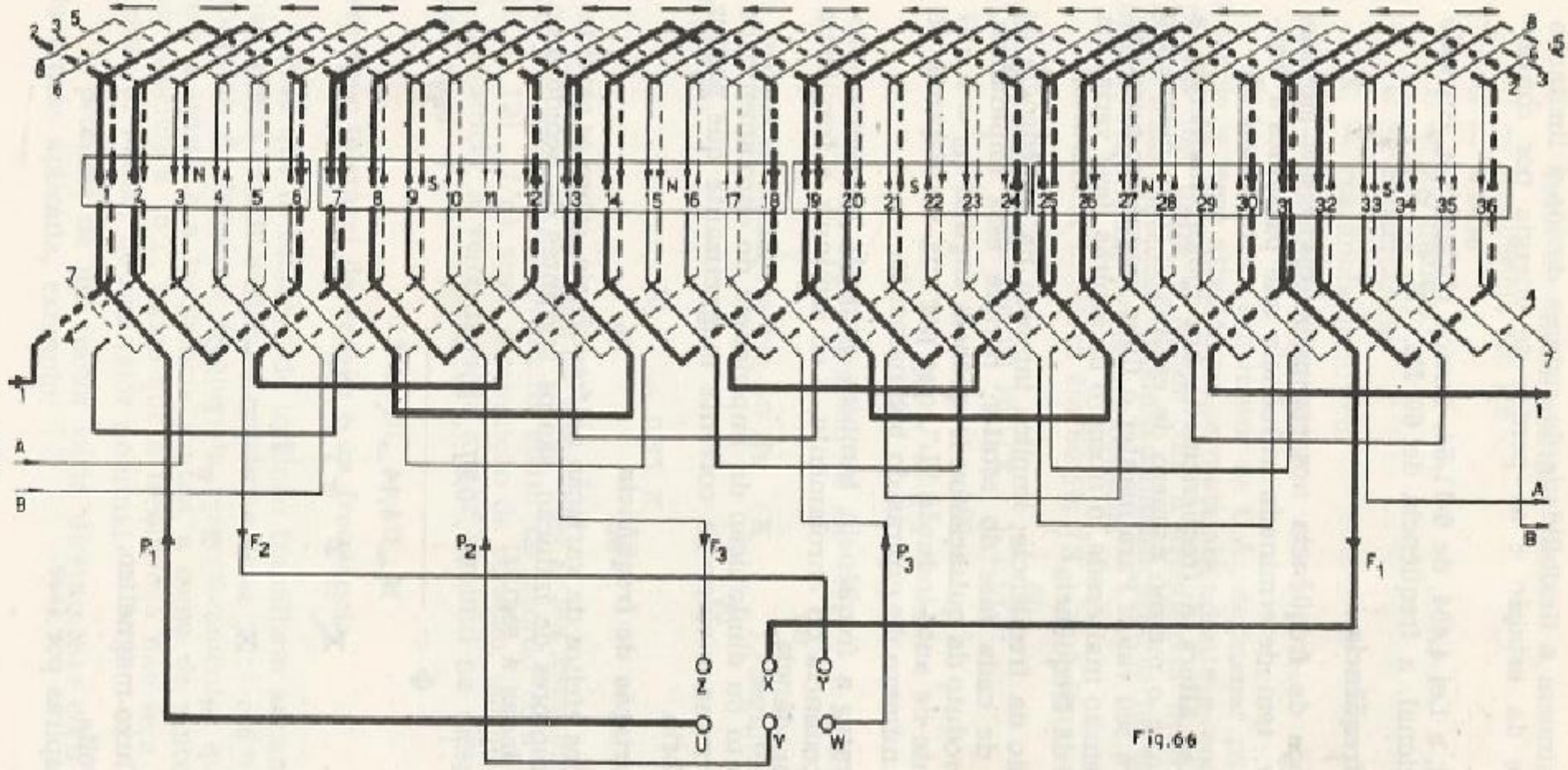


Fig. 66 — Enrolamento de um motor de 6 pólos, 36 ranhuras, passo 1-6.

soras que diminuem a flexibilidade do sistema devido à limitação de capacidade da estação e as perdas de energia por conversão, etc.

No Brasil, a Lei 4.454, de 6-11-64, tornou obrigatória, em todo território nacional, a freqüência de 60 Hz. (N. do R.).

Mudança de freqüência

A mudança de freqüência nos equipamentos, e nos motores em particular, tem determinada influência que passamos a analisar.

Quando se altera a freqüência de um motor, mantendo a mesma tensão, e o mesmo número de espiras, o fluxo magnético também altera seu valor. Para manter o fluxo magnético primitivo e ficando a tensão inalterada, o número de espiras deve variar na razão inversa da freqüência.

A variação da freqüência, implica também na impedância do enrolamento de cada fase do estator, porque esta impedância, depende do produto da pulsação ou freqüência angular ($\omega = 2 \pi f$) e do coeficiente de auto-indução "L", que por sua vez depende do quadrado do número de espiras do bobinamento.

Ao aumentar a freqüência, também aumenta na mesma proporção a impedância do enrolamento, e ao diminuir a freqüência diminui a impedância.

O aumento ou diminuição da impedância do enrolamento do estator, determina o valor da corrente magnetizante que produz o fluxo giratório.

Efeitos da variação de freqüência.

Alguns dos efeitos da variação da freqüência, sobre as características dos motores de indução, são os seguintes de acordo com as fórmulas dadas a seguir:

$$\Phi = \frac{V \cdot 0{,}97 \cdot 10^8}{N_e \cdot 4{,}44 \cdot f_e \cdot f} \qquad (47)$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \qquad (48)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \qquad (49)$$

onde;

Φ — fluxo magnético.
V — volts.
N_e — espiras por fase.

f_e — fator de enrolamento.

f — freqüência em Hz.

π = 3,1416

L — indutância.

C — capacitância.

X_L — reatância indutiva.

X_C — reatância capacitiva.

Ao transformar um motor de C.A., de menor para maior freqüência, o ferro ativo torna-se mais abundante e, com as mesmas perdas que tinha o motor com a freqüência inferior, obtém-se assim maior potência. Quando a modificação se faz de maior para menor freqüência, perde-se potência.

A reatância indutiva em 60 Hz ($X_{L_{60}}$), é igual a 1,2 vezes a reatância indutiva em 50 Hz ($X_{L_{50}}$), isto é:

$$X_{L_{60}} = 1{,}2\ X_{L_{50}} \qquad (50)$$

A reatância capacitiva em 60 Hz ($X_{C_{60}}$), é igual a 0,83 vezes a reatância capacitiva em 50 Hz ($X_{C_{50}}$), segundo a seguinte equação:

$$X_{C_{60}} = 0{,}83\ X_{C_{50}} \qquad (51)$$

Quando a mudança da freqüência é, por exemplo, de 60 para 50 Hz, trará como primeiro efeito de acordo com a fórmula 9 ($n = 120 \cdot f/p$), uma diminuição de rotação, porque diminuindo a freqüência, a velocidade do motor diminui na mesma razão ou vice-versa.

$$1{,}20 \cdot n_{50} = n_{60} \qquad (52)$$

Variação tolerável da tensão e da freqüência

Para que os motores de indução trabalhem satisfatoriamente, não devem existir variações máximas de ± 10% e 5% nos valores nominais de tensão e freqüência respectivamente; quando variarem a tensão e a freqüência juntas, a soma de ambos não deve ser superior a 10%, sendo que a frequência não seja mais de 5% acima ou abaixo de seu valor nominal.

A potência de um motor varia diretamente com o quadrado da tensão aplicada, exemplo:

Um motor dá 10 cv com 100% dá tensão, com 80% (0,80) dará;

$$10 \cdot 0{,}80^2 = 6{,}4 \text{ cv.}$$

Comportamento em 60 Hz dos motores de 50 Hz. Tensão e potência constantes

O comportamento do motor em marcha é satisfatório. A ventilação se torna mais eficaz pelo aumento da velocidade. O deslizamento fica inalterado. A lubrificação e arrefecimento melhoram. A corrente de magnetização diminui. Aumentam o desgaste, as perdas mecânicas e o atrito nos mancais. Aumentam os esforços mecânicos das partes girantes particularmente os devidos ao aumento da força centrífuga. As condições de marcha se alteram, o binário de partida e o conjugado máximo diminuem por causa da diminuição da indução, o que é de capital importância nos acionamentos que devem partir com plena carga. A capacidade mecânica de sobrecarga decresce, pois diminui o conjugado máximo, aumentando assim o tempo necessário para a aceleração. Podendo em certos casos não ser suficiente à demarragem (início de funcionamento ou de partida de um motor).

Comportamento em 50 Hz, dos motores de 60 Hz, tensão e potência constantes.

A diminuição da freqüência baixa as rotações do motor praticamente na mesma proporção. Ao baixar a velocidade do motor, as condições de marcha pioram bastante por causa da ventilação. A lubrificação e esfriamento pioram. A corrente de partida aumenta. O binário de partida e o conjugado máximo aumentam. Cresce a capacidade de sobrecarga. A corrente de magnetização aumenta. Melhoram os esforços mecânicos (atrito nos mancais, força centrífuga e vibração) ao baixar a velocidade.

Para evitar superaquecimento nos motores, torna-se necessário reduzir sua potência útil, isto é, estabelecer uma potência nominal menor.

EXERCÍCIO — 8

Dispõe-se de um motor trifásico com o rotor em curto-circuito (gaiola de esquilo) para uma freqüência de 50 Hz. A freqüência da rede local é de 60 Hz e há necessidade que o motor desenvolva o mesmo binário requerido para impulsionar a carga que tinha em 50 Hz.

O motor tem: 10 cv, 1500 rpm, 380 volts, cos $\varphi = 0{,}8$.

A execução desta modificação consiste em reenrolar o motor substituindo o bobinamento do estator.

Determina-se o número de pólos pela fórmula 9 que dará:

$$p = \frac{120 \cdot f}{n} = \frac{120 \cdot 50}{1500} = 4$$

quatro pólos.

A velocidade para a nova freqüência de 60 Hz será:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 60}{4} = 1800$$

ou

$$1{,}20 \cdot n_{50} = n_{60};\ 1{,}20 \cdot 1500 = 1800$$

de 1800 rpm.

O aumento de rotação devido à mudança da freqüência de 50 Hz para 60 Hz é de:

$$\frac{1800 - 1500}{1500} \cdot 100 = 20\ \%$$

As velocidades dadas nas fórmulas são aproximadas, porque há variação do deslizamento do rotor em relação ao campo do estator como já foi explicado em capítulos precedentes.

Ao rebobinar-se o motor para manter o fluxo primitivo e ficando a tensão inalterada, significa: reduzir o número de espiras segundo a fórmula 36 na razão inversa da freqüência, e como ao diminuir o número de espiras fica mais espaço livre nas ranhuras, aumenta-se a seção do condutor na mesma porcentagem que se diminui o número de espiras. O motor suporta mais corrente e aumenta a potência ao operar em 60 Hz. Com isso o motor desenvolverá um binário de partida e um conjugado máximo, aproximadamente iguais aos de 50 Hz.

EXERCICIO — 9

Um motor de 200 volts, 1800 rpm, e 60 Hz, é preciso que trabalhe num sistema de 50 Hz com a mesma voltagem anterior.

Ao variar a freqüência do motor, equivale a mudar a tensão na razão da diminuição da freqüência. Portanto se o motor funciona com uma tensão de 100%, deve-se aplicar uma tensão de:

$$\frac{50}{60} \cdot 100 = 83\% \quad \text{ou} \quad \frac{50}{60} \cdot 220 = 183$$

aproximadamente 83% da tensão original, isto é, 183 volts ao funcionar com 50 Hz.

Como a tensão é a mesma que em 60 Hz, já que a tensão da rede não pode ser diminuida por causa das lâmpadas e dos aparelhos domésticos, dever-se-á aumentar o número de espiras em: 100/83 = 1,2 vezes, ou seja, aproximadamente um aumento de 20% sobre o número primitivo e, diminuir a seção do fio do enrolamento na mesma proporção.

Resumidamente, reenrolar o motor para 50 Hz, significa aumentar o número de espiras e diminuir a seção do fio do enrolamento O motor suporta menos corrente, diminui a potência e com isso os binários exigidos são aproximadamente iguais aos de 60 Hz.

MUDANÇAS DE FASE E DE TENSÃO

Algumas vezes, por necessidade de serviço, é necessário projetar motores para que possam trabalhar independentemente em redes bifásicas ou em linhas de alimentação trifásicas. O caso mais freqüente desta natureza é o de um motor bifásico poder transformar-se em trifásico ou vice-versa. Das duas transformações, a de bifásico para trifásico, pode-se fazer com mais facilidade pela razão de que um motor bifásico normal tem aproximadamente 25% mais espiras em série que um motor trifásico das mesmas características.

Normalmente, ao ser transformado o enrolamento para adaptá-lo a um número de fases diferente, é necessário mudar também ao mesmo tempo a voltagem com a qual há de funcionar o motor.

Influência da mudança de fase nos rotores bobinados

No caso de motores com rotor bobinado, as mudanças de fase e de voltagem não influem no enrolamento do rotor, desde que com a nova ligação se obtenham as condições de funcionamento corretas. Isto é, devido a que o campo girante não é bifásico nem trifásico, ou seja, que é exatamente igual como se fosse criado por uma corrente contínua. O campo girante tem o mesmo valor antes e depois de fazer a reconexão e terá o mesmo efeito nas bobinas do rotor para gerar a f.c.e.m. Haverá a mesma voltagem entre os anéis que existia na ligação original e não será preciso nenhuma alteração no reostato de partida.

As figs. 67, 68 e 69 apresentam os diagramas do enrolamento de um motor especial para mudança de fase e tensão.

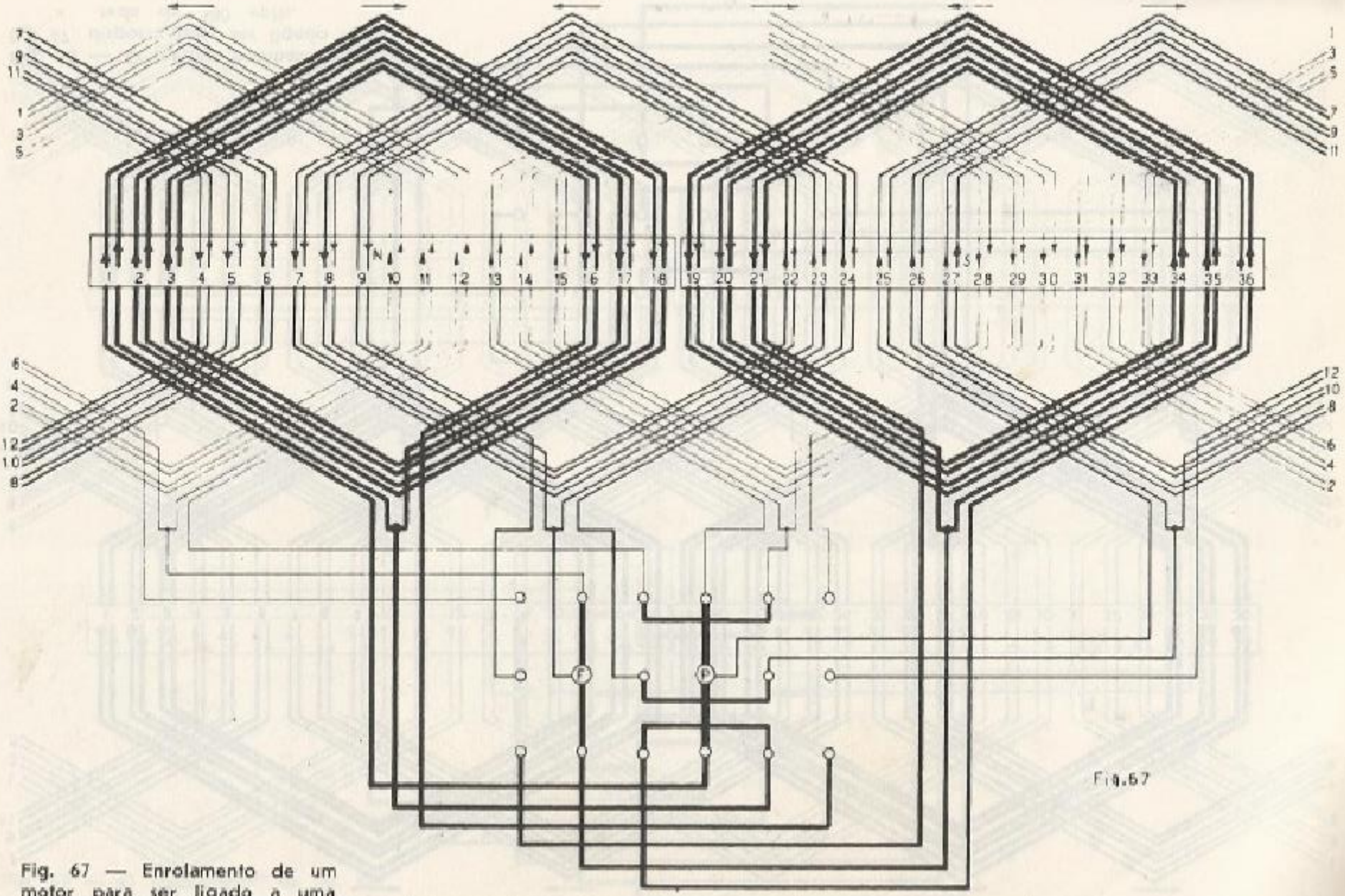


Fig. 67 — Enrolamento de um motor para ser ligado a uma rede bifásica.

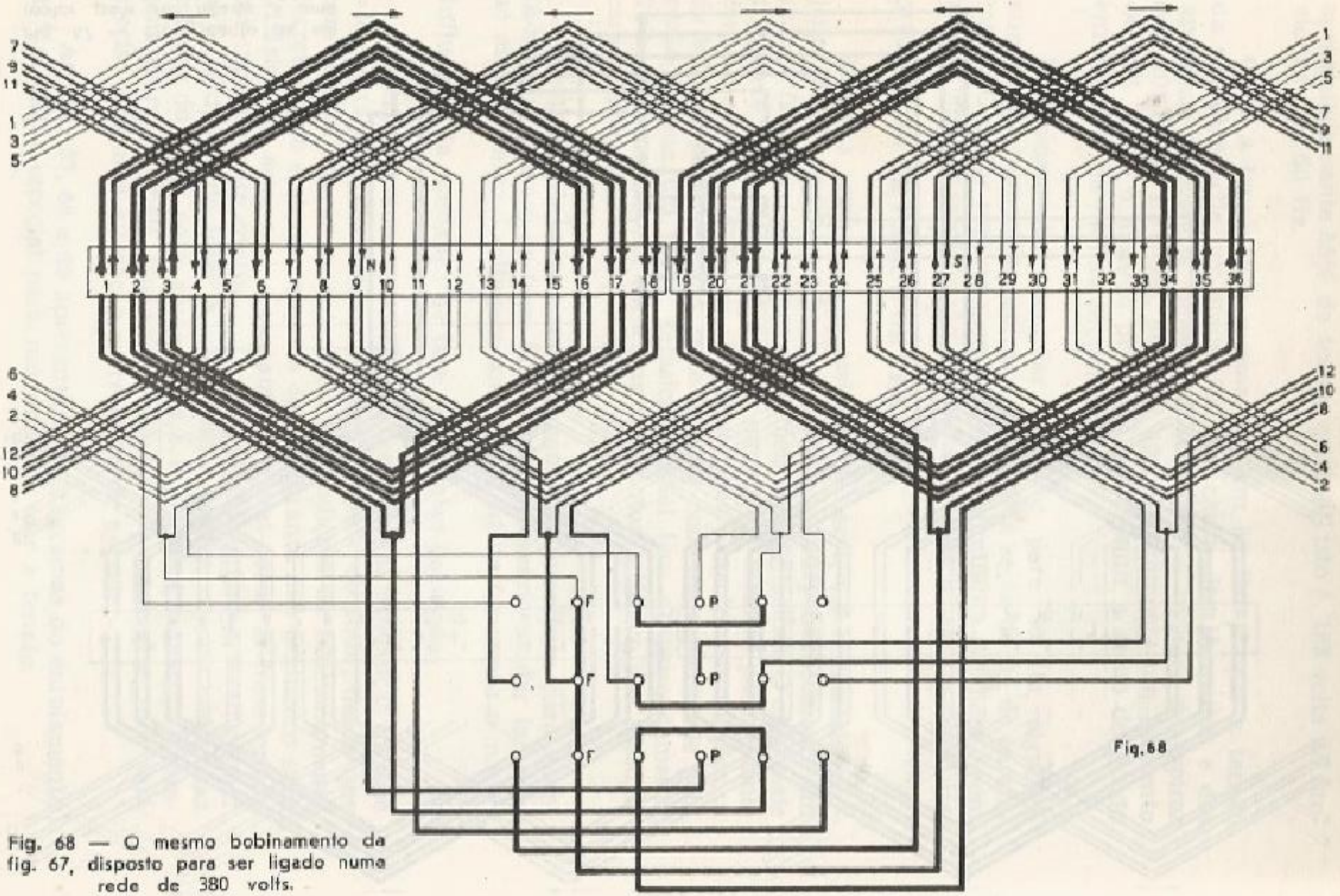


Fig. 68 — O mesmo bobinamento da fig. 67, disposto para ser ligado numa rede de 380 volts.

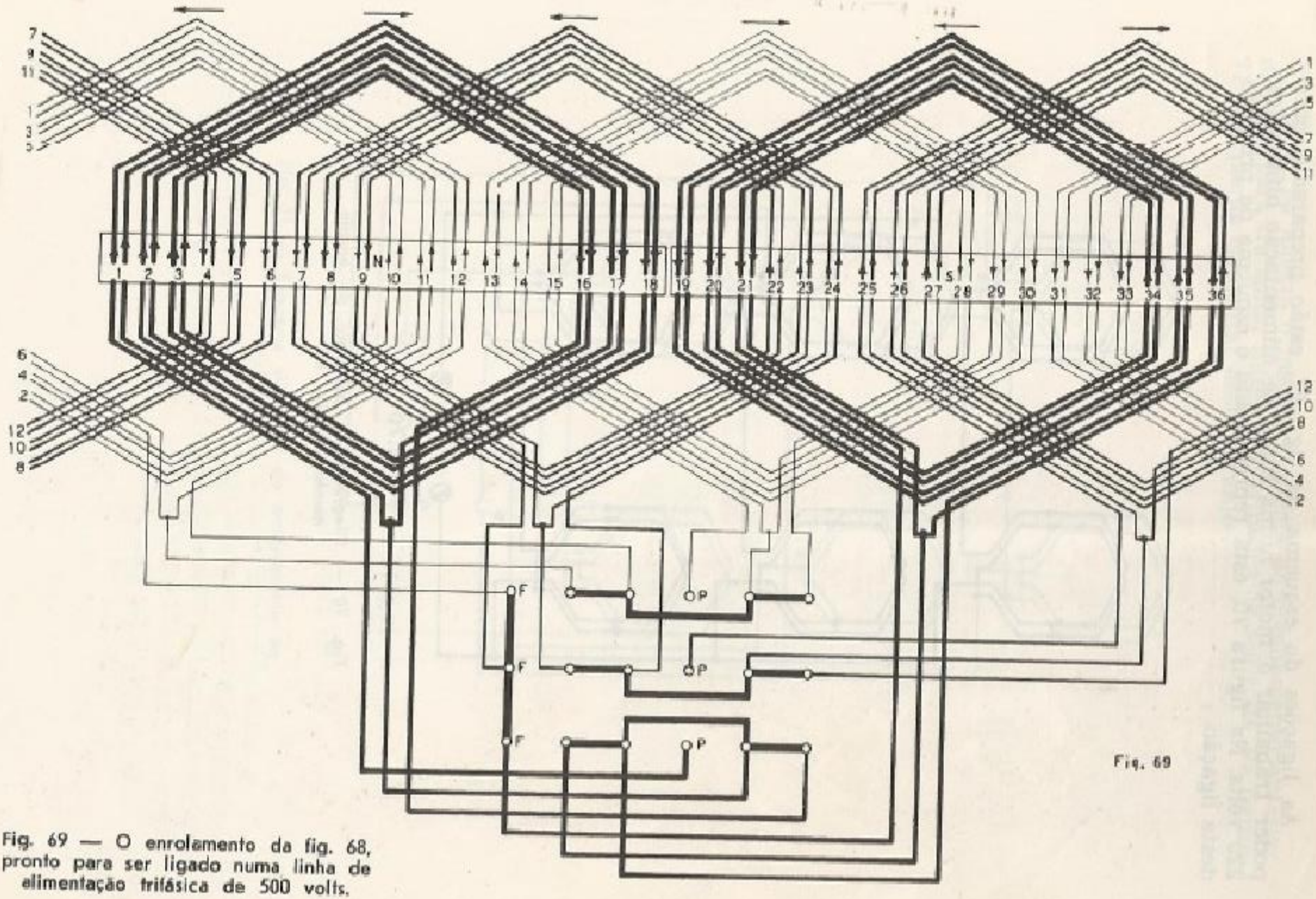


Fig. 69

Fig. 69 — O enrolamento da fig. 68, pronto para ser ligado numa linha de alimentação trifásica de 500 volts.

As ligações do esquema da fig. 67, estão preparadas para poder trabalhar o motor numa linha de alimentação bifásica de 220 volts. Na figura 70, está representado o esquema de princípio desta ligação.

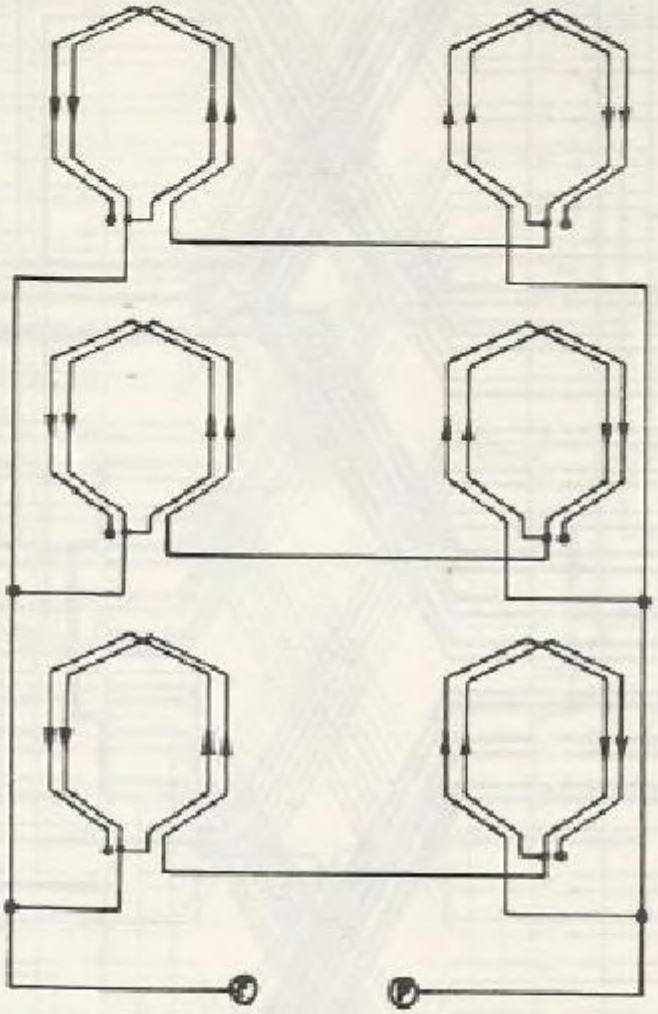


Fig.70

Fig. 70 — Diagrama de princípio do enrolamento da fig. 67.

A fig. 68 mostra o mesmo esquema do bobinamento anterior disposto para trabalhar numa rede trifásica de 380 volts. Na figura 71, o esquema elementar deste arranjo.

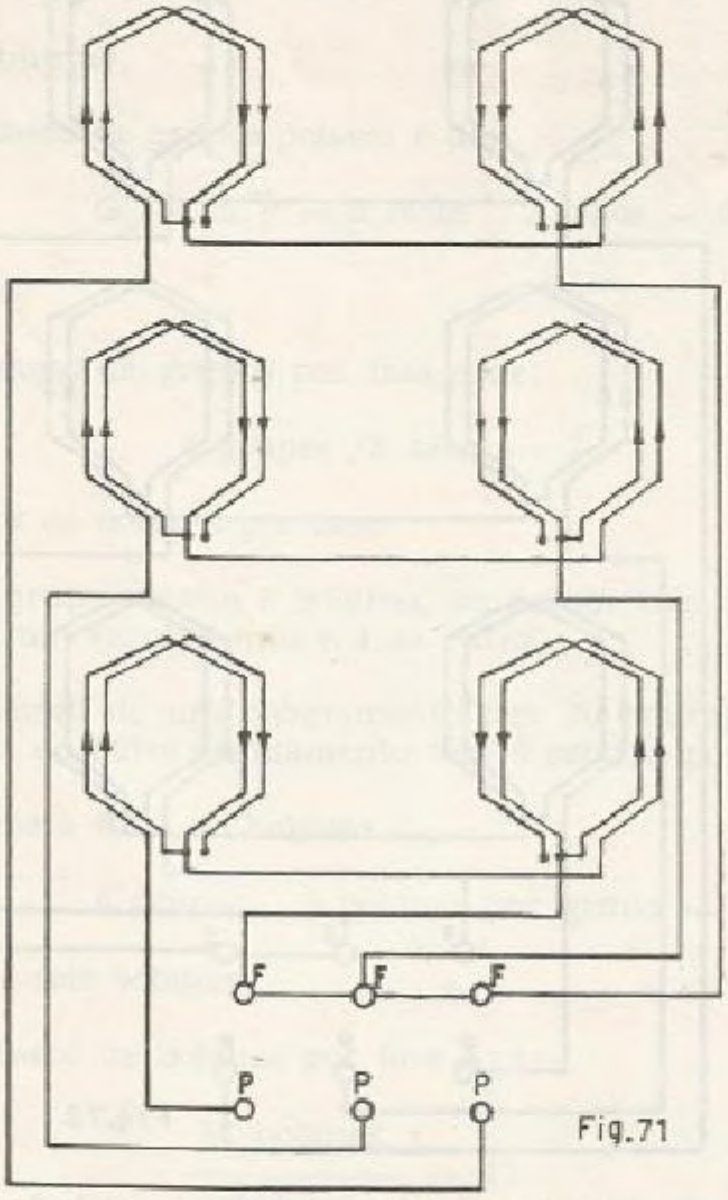


Fig. 71 — Esquema elementar do bobinamento da fig. 68.

Na fig. 69 está conectado o enrolamento do motor para ser ligado a uma linha de alimentação trifásica de 500 volts. A fig. 72, mostra o esquema funcional desta ligação.

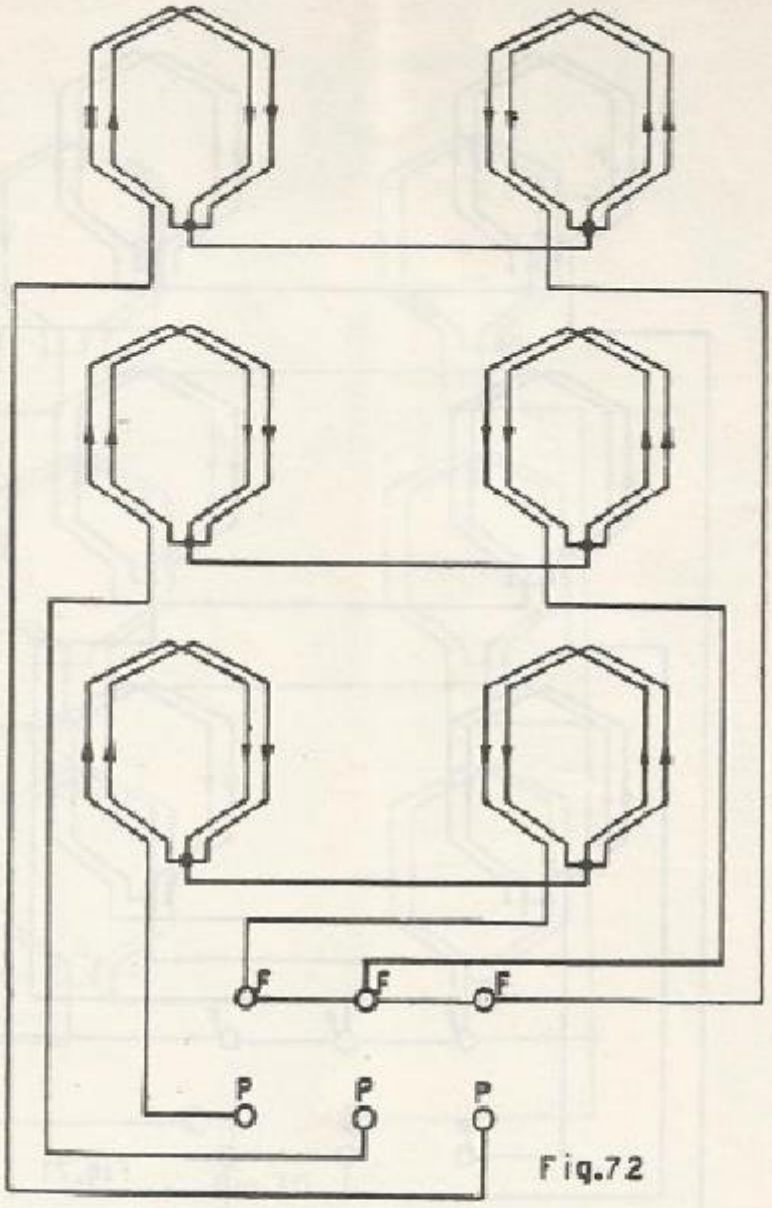


Fig. 72 — Diagrama funcional do esquema da fig. 69.

O bobinamento do estator é composto de dois enrolamentos independentes, de bobinas concêntricas, onde as bobinas de um mesmo grupo são de passos diferentes. Os passos são os seguintes: 16 — 3 — 13, 17 — 2 = 15, 18 — 1 — 17.

E o passo meio será:

$$\frac{13 + 15 + 17}{3} = \frac{45}{3} = 15$$

de quinze ranhuras.

O número de ranhuras por pólo e por fase é:

$$q = \frac{Q}{m \cdot p} = \frac{36 \text{ ranhuras}}{3 \text{ fases} \cdot 2 \text{ pólos}} = \frac{36}{6} = 6$$

de seis ranhuras.

O número de grupos polares é de:

$$G_p = m.p = 3 \text{ fases} \cdot 2 \text{ pólos} = 6$$

seis grupos.

O número de grupos por fase é de:

$$6 \text{ grupos} / 3 \text{ fases} = 2$$

dois grupos de bobinas por fase.

Cada grupo contém 6 bobinas, sendo que três bobinas correspondem a um enrolamento e 3 ao outro.

As bobinas de um bobinamento têm 20 espiras cada bobina. As bobinas do outro enrolamento têm 6 espiras por bobina.

O número total de bobinas é:

$$6 \text{ grupos} \cdot 6 \text{ bobinas por grupo} = 36$$

de trinta e seis bobinas.

O número de bobinas por fase será:

$$\frac{36 \text{ bobinas}}{3 \text{ fases}} = 12$$

de doze bobinas.

Número de espiras por fase. Como cada bobina dos dois enrolamentos estão composta de 20 e 6 espiras respectivamente e são 12 o número de bobinas por fase, sendo seis de cada enrolamento. Então teremos:

$$20 \quad 6 = 120 \; ; \quad 6 \cdot 6 = 36 \; ; \quad 120 + 36 = 156$$

que é de 156 o número de espiras por fase.

Capítulo 13

MOTORES PARA VÁRIAS TENSÕES

Introdução

Alguns tipos de motores se constroem para que possam funcionar com duas, três ou quatro tensões diferentes, podendo assim ser utilizado um mesmo motor em localidades onde a voltagem da rede de alimentação tem valores diferentes.

Nas duas maneiras conhecidas de agrupar as fases dos enrolamentos trifásicos, isto é, estrela ou triângulo; um motor ligado em triângulo-série pode operar com uma tensão 1,73 vezes superior ao ser conectado em estrela-série, ou vice-versa; um motor com ligação estrela-série, pode passar a funcionar em outra linha de alimentação com uma voltagem 1,73 vezes menor quando é reconectado em triângulo-série, isto é, quando a razão da tensão é de $1 \div \sqrt{3}$.

Mais acima, foi visto um motor que pode operar com três voltagens diferentes e, onde ao passar da tensão bifásica de 220 volts para a trifásica de 380 volts, é necessário reduzir em uns 25% aproximadamente o número de bobinas, deixando-as mortas ou inativas. Estas mesmas bobinas fecham-se em curto-circuito quando há necessidade de que o motor funcione em uma rede de 500 volts.

Ligação série-paralelo

Em determinados casos, é interessante dispor-se o enrolamento do motor de forma que cada fase possa ser ligada à vontade, em série ou então formando dois circuitos paralelos.

Esta forma de dispor-se as ligações do enrolamento é conhecida com o nome de ligação série-paralelo e, é com o principal objetivo de tornar possível que um mesmo motor possa ser utilizado em localidades com linhas de alimentação de tensões diferentes, sempre que uma das tensões seja o dobro da outra.

A potência do motor não altera, porque enquanto que a tensão da linha fica reduzida à metade, a intensidade da corrente aumenta o dobro ou, vice-versa.

A ligação série-paralelo é possível tanto nos enrolamentos em que suas fases estão agrupadas em estrela, como naqueles motores que têm as fases agrupadas em triângulo, desde que sejam cumpridas as seguintes condições:

a) O cálculo de um enrolamento previsto com circuitos paralelos é idêntico ao dos enrolamentos aqui estudados do tipo de circuito único, isto é, em que todos os grupos ou todas as espiras de cada fase acham-se ligadas em série;

b) Os circuitos paralelos devem estar perfeitamente equilibrados para tal cada um deles deverá ter o mesmo número de bobinas em série e estarão agrupadas de forma idêntica;

c) As correntes que percorrem os distintos circuitos paralelos, devem fazê-lo no sentido conveniente para que fiquem formados corretamente os pólos do enrolamento;

d) Deverá ser igual à resistência e reatância de cada um dos enrolamentos ligados em paralelo, etc.

Ligação de um motor em estrela para duas tensões

Normalmente, nos motores de dupla tensão, a caixa de ligações tem nove terminais para assegurar a mudança de voltagem o mais rápida e simples possível.

Internamente são ligados em estrela os finais das três fases. Cada fase é dividida em duas metades, ficando aberta a ligação entre estas duas metades, porque os terminais são levados até a caixa de ligações. Dos nove terminais, três correspondem às entradas das fases e os outros seis aos pontos de corte dos centros das fases.

Para facilitar o trabalho de instalação e a alteração de tensão, o diagrama de ligação é gravado na placa de carcteristicas, fig. 73, e os cabos do motor, são fabricados com identificação permanente por meio de numeração gravada em metal ou por cores codificadas fig. 74, dando maior facilidade de seqüência aos diagramas, não permitindo enganos e possibilitando a troca de ligações com grande rapidez.

Fig. 73

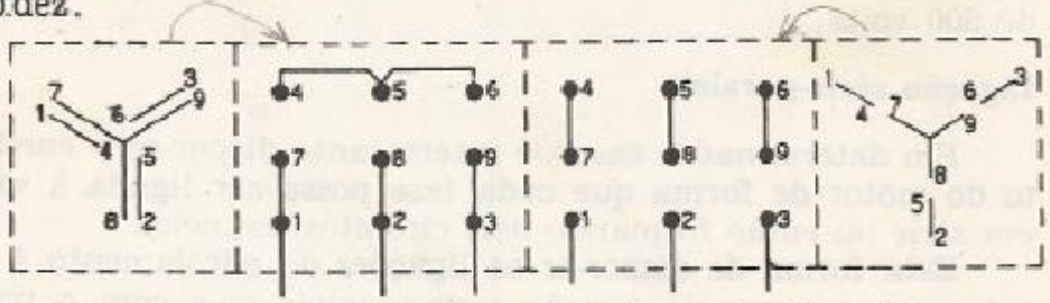


Fig. 73 — Diagrama de ligações gravado na placa de caracteristicas dos motores.

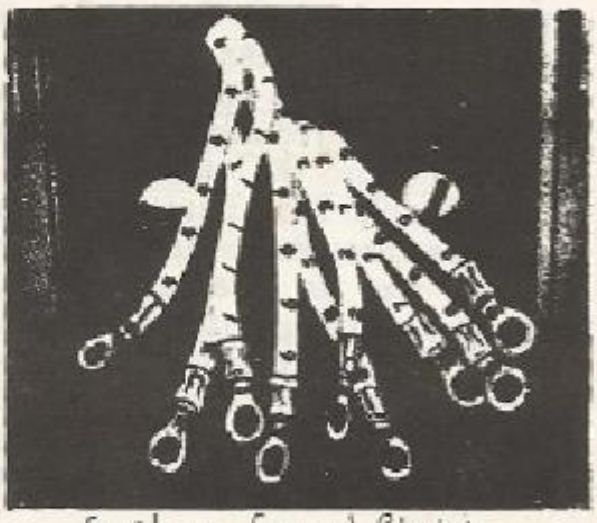


Fig. 74 — Caixa de ligações com identificação permanente dos terminais do motor.

Cortesia General Electric

Para ligar o motor a tensão maior, liga-se o bobinamento em estrela-série segundo mostra fig. 75. Para ligar este mesmo motor a uma tensão menor procede-se como indica a fig. 76, ligando o enrolamento em estrela-paralelo, onde os terminais 4, 5 e 6 formam um ponto neutro externo.

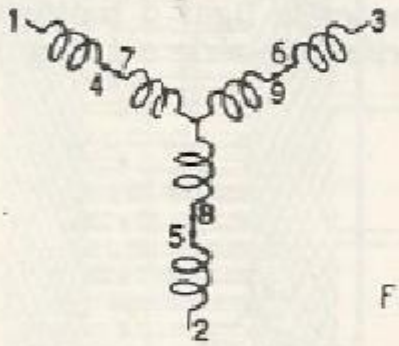


Fig.75

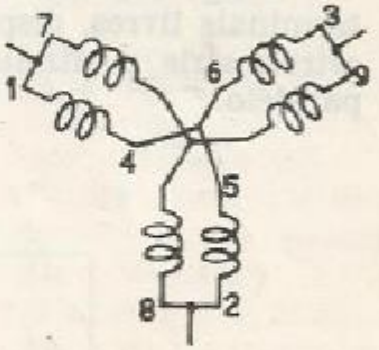


Fig. 76

Fig. 75 — Ligação estrela-série para a tensão superior.

Fig. 76 — Conexão estrela-paralelo para a tensão inferior.

Motor com ligação triângulo para duas tensões

Neste tipo de ligação as três fases do enrolamento são ligadas internamente em triângulo e, como no caso anterior, cada fase é dividida em duas metades, levando até a caixa de ligações nove terminais, três correspondentes aos vértices do triângulo e os outros seis aos centros das fases.

A fig. 77, mostra o diagrama de ligações gravado na placa de características.

Fig.77

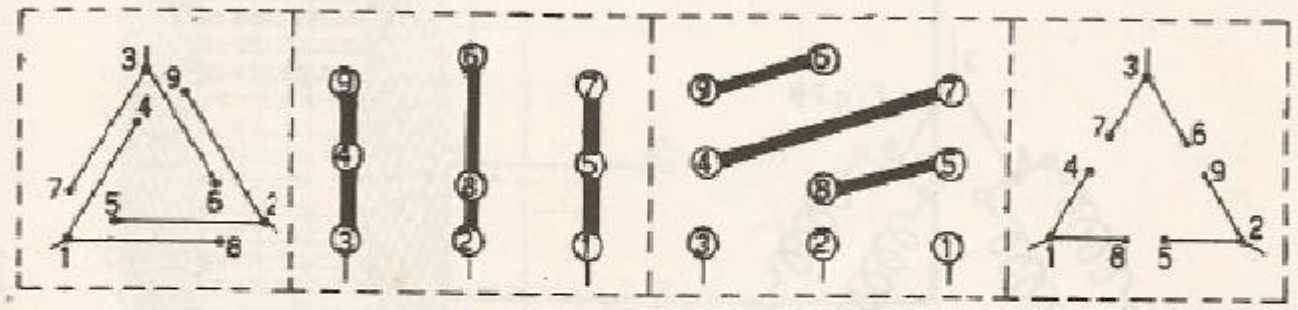


Fig. 77 — Diagrama de ligações gravado na placa de características.

Na fig. 78, está indicada a forma de se ligar o enrolamento do motor em triângulo-série para a tensão maior.

Para este mesmo motor poder funcionar com a tensão menor, deve-se ligar o enrolamento em triângulo-paralelo segundo está mostrado na fig. 79.

A fig. 80, mostra o enrolamento de um motor com todos seus terminais livres, dispostos assim para poder-se ligar o motor em estrela-série e estrela-paralelo, ou em triângulo-série e triângulo-paralelo.

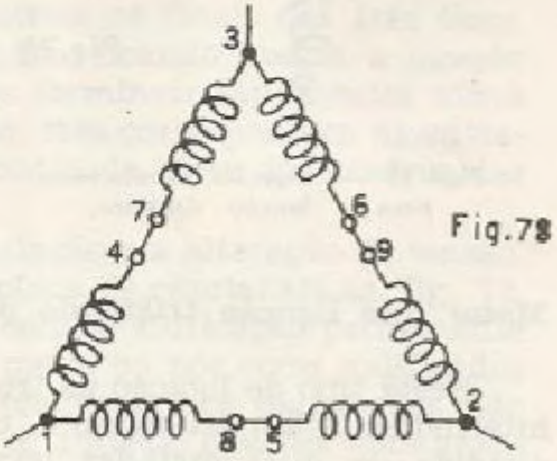


Fig. 78

Fig. 78 — Ligação em triângulo-série para a tensão maior.

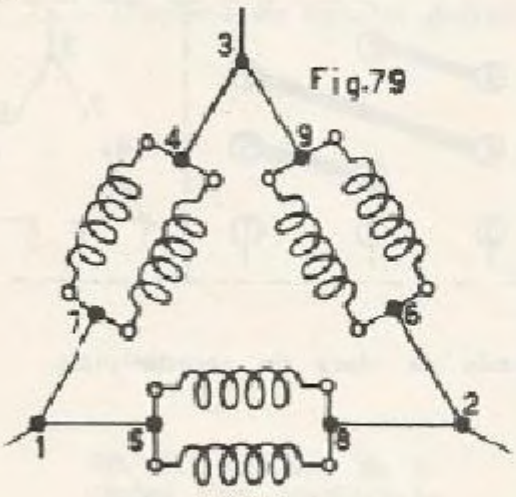


Fig. 79

Fig. 79 — Conexão triângulo-paralelo para a tensão menor.

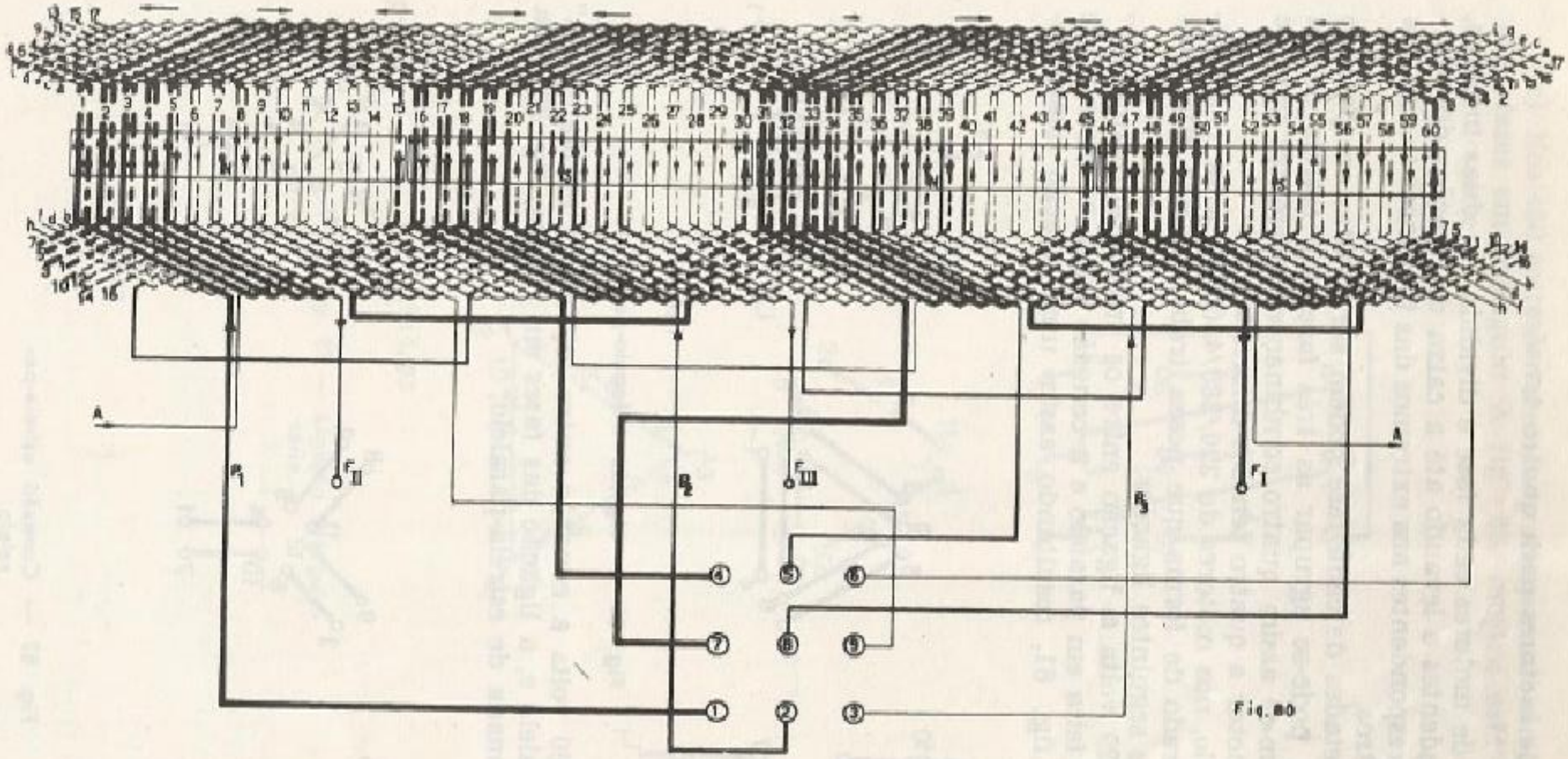


Fig. 80 — Bobinamento do estator de um motor trifásico que pode ser ligado em estrela-série, estrela-paralelo, ou em triângulo-série, triângulo-paralelo.

Enrolamentos de motores para quatro tensões

Neste tipo de motores cada fase é dividida em duas metades, ficando independentes e levando até a caixa de ligações doze terminais seis correspondentes aos extremos das três fases e os outros seis a seus centros.

As duas metades de cada fase podem ser ligadas em paralelo ou em série e, pode-se agrupar as três fases em estrela ou em triângulo, obtém-se assim quatro combinações diferentes para se poder ligar o motor a quatro tensões diferentes.

Por exemplo, nos motores de 220/380/480/760 volts, o enrolamento é preparado de forma que possa trabalhar nas diferentes tensões, com as seguintes ligações:

a) Para 220 volts a ligação entre os "meios enrolamentos" de cada fase é feita em paralelo e a conexão entre as fases faz-se em triângulo, fig. 81, resultando assim uma ligação triângulo-paralelo;

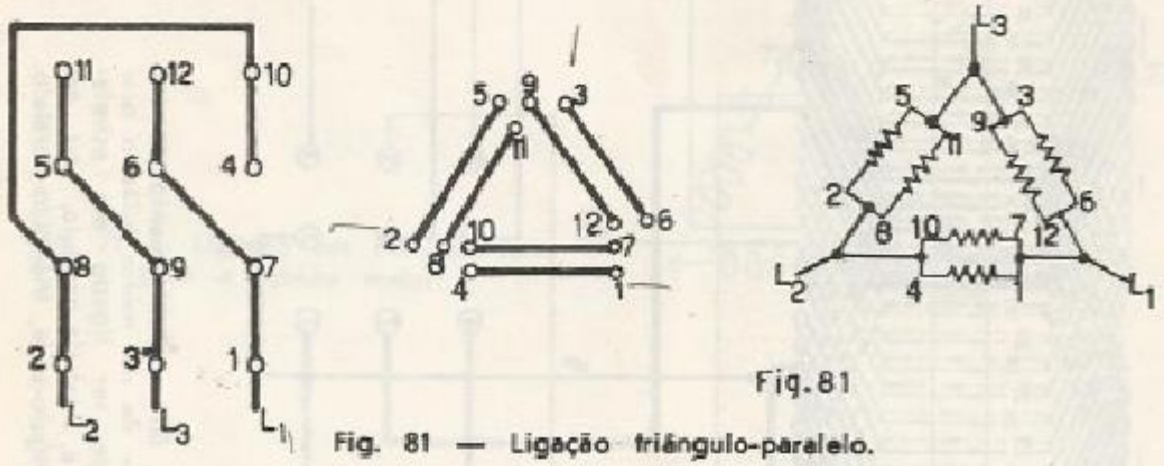


Fig. 81

Fig. 81 — Ligação triângulo-paralelo.

b) Em 380 volts a conexão entre os "meios enrolamentos" faz-se em paralelo e, a ligação das fases em estrela, fig. 82. Esta conexão é chamada de estrela-paralelo;

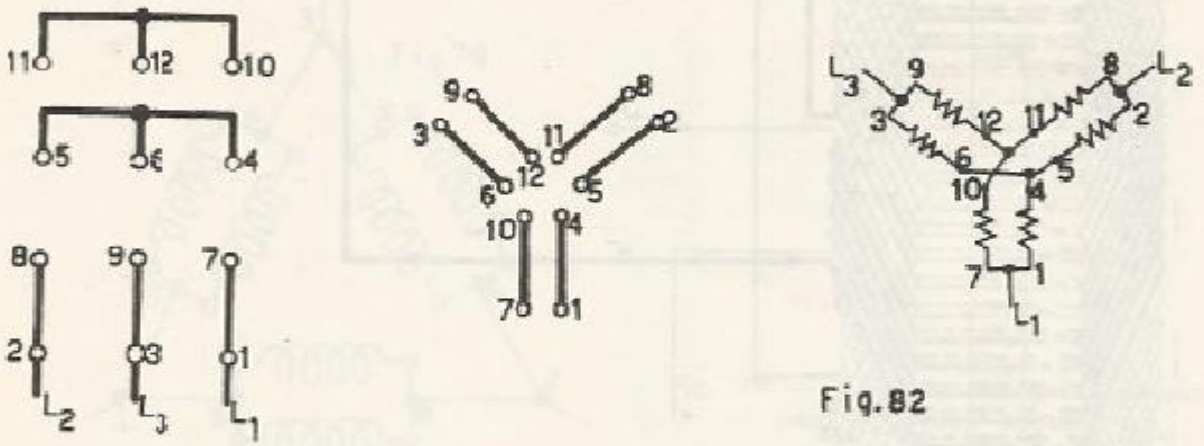


Fig. 82

Fig. 82 — Conexão estrela-paralelo.

c) Nos 480 volts os "meios enrolamentos" são ligados em série e as fases em triângulo. A fig. 83, mostra este tipo de ligação triângulo-série;

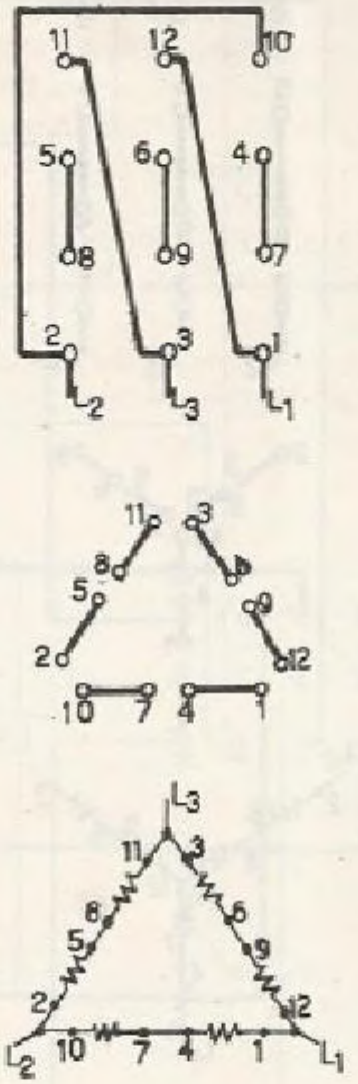


Fig. 83

Fig. 83 — Ligação triângulo-série.

d) Na tensão de 760 volts ligam-se os "meios enrolamentos" em série e, as fases, são agrupadas em estrelas, fig. 84, obtendo-se desta forma a conexão estrela-série.

Fig. 84

Fig. 84 — Conexão estrela-série

Esta disposição das ligações permite que o motor possa quando ligado em: 220 volts, iniciar a partida em estrela-paralelo e ficar funcionando em triângulo-paralelo; 440 volts, partir com o estator ligado em estrela-série e, após passar a operar ligado em triângulo-série.

A fig. 85 mostra o bobinamento e a disposição dos terminais, possibilitando a troca de ligações com grande rapidez para poder ser ligado a qualquer uma das quatro tensões para as quais o motor foi projetado.

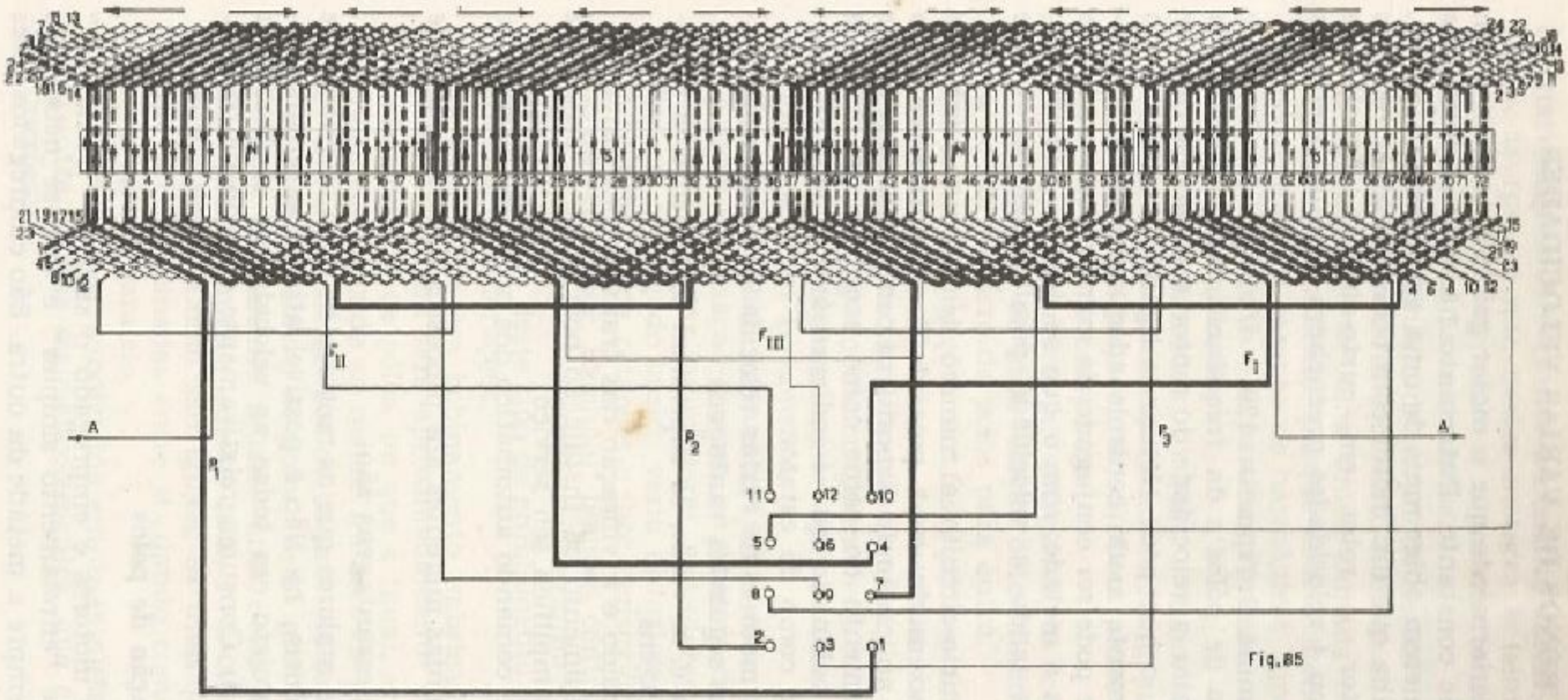


Fig. 85 — Enrolamento de um motor que pode ser ligado a quatro tensões diferentes.

MOTORES ASSÍNCRONOS DE VÁRIAS VELOCIDADES

Afirmou-se anteriormente que o motor gaiola de esquilo é um motor de velocidade constante. Entretanto há muitas aplicações industriais que requerem obter mais de uma velocidade do motor. A economia aconselha que um motor com bobinamento e ligações especiais no estator, e rotor em curto-circuito (gaiola de esquilo), com 2, 3 ou 4 velocidades preencherá adequadamente as necessidades.

Vê-se pela fórmula 9 (rpm — 120 . f/p) que a velocidade depende do número de pólos e da freqüência, sendo esta última invariável. Para variar a velocidade do motor será preciso mudar o número de pólos, o que pode efetuar-se ligando o enrolamento do estator externamente a um controle adequado, isto é, o bobinamento do estator pode ser conjugado de maneira que o número de pólos baixe para a metade, com o que se duplica sua rotação, ou vice-versa, não tendo a velocidade possibilidade de ajuste gradual.

No rotor em curto-circuito o número de pólos se estabelece automaticamente ao mudar-se a polaridade no enrolamento do estator, isto evita a aplicação de dispositivos complexos para trocar os pólos do bobinamento do rotor como acontece no caso dos motores com rotor bobinado, que é indispensável mudar as conexões tanto do rotor como do estator.

O emprego dos motores de várias velocidades com enrolamentos múltiplos tem as seguintes vantagens:

a) Simplificam e, às vezes, se suprimem totalmente as transmissões por engrenagens;

b) Elimina o ruído e a vibração das transmissões dentadas;

c) Eleva o rendimento da instalação pois reduz a perda nas transmissões e se simplifica seu serviço;

d) Simplifica o comando automático dos processos de partida, parada e reversão;

e) Reduz as perdas inerentes aos processos de arranque e de frenação, etc.

As principais desvantagens são:

a) Mais caros e maiores que os motores de uma só velocidade para a mesma potência; b) Não é possível atingir-se simultaneamente o melhor projeto em todas as velocidades; c) Tem pior fator de potência; d) Consumo relativamente elevado na partida, etc.

Motores de comutação de pólos

Neste tipos de motores é empregado o sistema "Dahlander" conhecido como de "enrolamento simples" e deve-se notar que uma velocidade é sempre a metade da outra. São empregados estes

bobinamentos onde se torna necessário variar, para relações definidas, as rpm, o que nestes motores é feito pela mudança do número de pólos, mantendo-se a mesma tensão e freqüência nominais para ambas as velocidades.

A corrente e binário de arranque destes motores estão dentro das margens dos rotores em curto-circuito.

O enrolamento de uma única camada não é indicado para este tipo de bobinamento, porque com o menor número de pólos aparecem intensos campos de harmônicos superiores que prejudicam o funcionamento e a partida. Por isto os enrolamentos tipo Dahlander são construídos:

a) Em duas camadas; b) Para o maior número de pólos; c) Cada uma das três fases espaçadas de 120 graus elétricos em relação as duas outras adjacentes; d) Com passo diametral a fim de melhorar a curva do campo, etc.

Os fluxos magnéticos no entreferro, os conjugados e a potência, variam dentro de uma relação determinada ao se fazer a mudança de um número de pólos para outro.

Por meio das ligações das fases pode-se controlar esta relação e se adaptar o enrolamento a determinados casos de serviço. Os três casos seguintes são os mais comuns:

1 — O conjugado básico permanece constante, isto é, a potência varia proporcionalmente com o número de rotações, por exemplo, máquinas ferramentas;

2 — A potência permanece constante, isto é, o conjugado básico varia em relação inversa ao número de rotações. Exemplo; acionamento de trens laminadores, elevadores, etc.;

3 — O conjugado básico varia aproximadamente com o quadrado do número de rotações e, por conseguinte, a potência com o cubo da velocidade. Exemplo; bombas centrífugas partindo com a carga, ventiladores, compressores, exautores, etc.

Na elaboração deste tipo de enrolamento deve-se ter em conta as seguintes considerações:

a) Deverá ser um bobinamento imbricado de duas camadas e o passo da bobina será aproximadamente integral com relação ao maior número de pólos, ou que é igual, será metade do passo pleno que corresponde ao menor número de pólos;

b) O número de grupos de bobinas de cada fase terá que ser igual ao menor número de pólos. Estes grupos se distribuem em duas partes exatamente iguais, uma delas estará formada por todos os grupos ímpares desta fase, e a outra parte por todos os grupos pares. Como são iguais, as duas partes de cada fase poderão ser combinadas entre si, dando como resultado ligações em série ou em paralelo.

c) A cada fase, subdividida em duas metades, liga-se um terminal entre os dois meio-enrolamentos, que é levado até a caixa de conexões;

d) De cada fase usam-se três saídas, correspondendo uma ao início outra ao final, e a terceira saída à ligação que une as duas metades da fase.

Mudança do número de pólos

Num enrolamento construído de acordo com as indicações anteriores, podem-se obter duas velocidades com uma relação de 1:2, variando o número de pólos pela simples modificação das conexões do enrolamento, utilizando-se o método de "pólo-conseqüente", no qual os 6 meio-enrolamentos do estator são utilizados em ambos os valores da velocidade. Nas figs. 47 e 48 acha-se indicado o método.

Admitindo que em um determinado momento a corrente na fase entra pelo princípio "P" (fig. 47), e sai pelo final "F", constitui-se um enrolamento de passo integral, de meia bobina, produzindo 8 pólos, metade dos quais são pólos "S" ou "pólos conseqüentes" como está mostrado na figura.

Quando a corrente entra pelo condutor ou ligação "C" que une as duas metades da fase e sai pelos extremos "P" e "F" formam-se 4 pólos, dois "N" e dois "S", segundo está indicado na fig. 48.

Em ambas as figs. 47 e 48, os sentidos dos valores instantâneos das correntes são os que as flechas indicam.

Como as características dos enrolamentos deste tipo se baseiam no fato de que cada fase está subdividida em dois circuitos, num destes dois ramais o sentido do campo é o mesmo para as duas polaridades, e no outro circuito, muda quando passa de uma para outra polaridade.

Nos bobinamentos de "pólos conseqüentes", colocando-se flechas nos grupos polares de uma fase, na direção do centro da estrela formada pelas três fases, as setas serão todas do mesmo sentido. Isto se explica porque num enrolamento deste tipo, há somente a metade de grupos polares em cada fase para o mesmo número total de pólos dos que correspondem a um enrolamento do tipo comum.

Princípio das fases.

Embora com um só enrolamento conseguindo-se duas polaridades diferentes, a prática tem demonstrado que o princípio e o fim da segunda fase deve resultar deslocado de 120 °E com relação à primeira, ou seja, a 1/3 do número total de ranhuras do estator com relação à fase anterior e, respectivamente, o princípio e o fim da terceira fase defasada de 120° tanto da segunda como da primeira fase e correspondentes ao menor número de pólos.

Agrupamento das fases na conexão Dahlander.

As três fases de um enrolamento em ligação Dahlander podem ser agrupadas em estrela ou em triângulo, e as duas metades de

cada fase por sua vez podem-se unir em série ou em paralelo. Isto demonstra que é grande o número de ligações possíveis. Porém as combinações mais usadas são: estrela, dupla estrela; triângulo, dupla-estrela; isto é, estrela em série, estrela em paralelo, triângulo em série e estrela paralelo.

Ligação estrela, dupla-estrela.

Agrupam-se internamente unindo-se os fins das três fases num nó único formando uma estrela simples, levam-se até a caixa de ligações seis terminais independentes, três são os princípios das fases e os outros três correspondem as tomadas centrais de cada fase, figs. 86, 87 e 88.

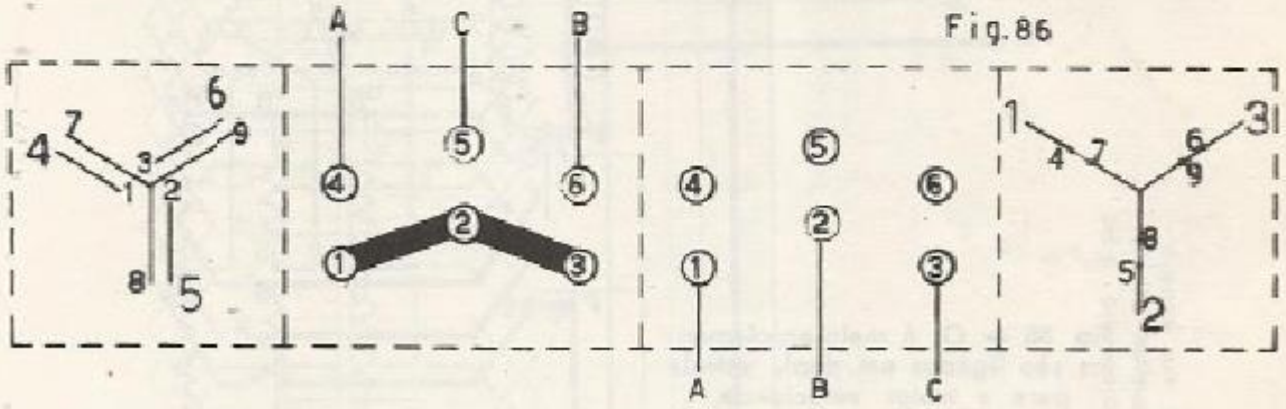


Fig. 86 — Caixa de ligações com o diagrama para a ligação estrela-série paralelo.

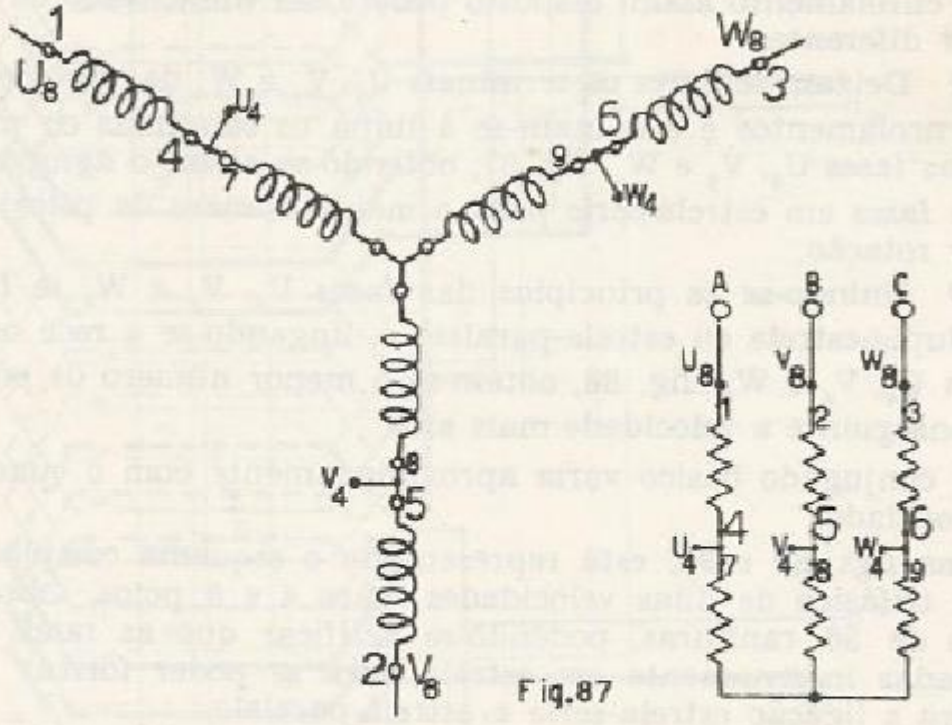


Fig. 87 — Ligação estrela-série dos 6 meio-enrolamentos para a polaridade maior.

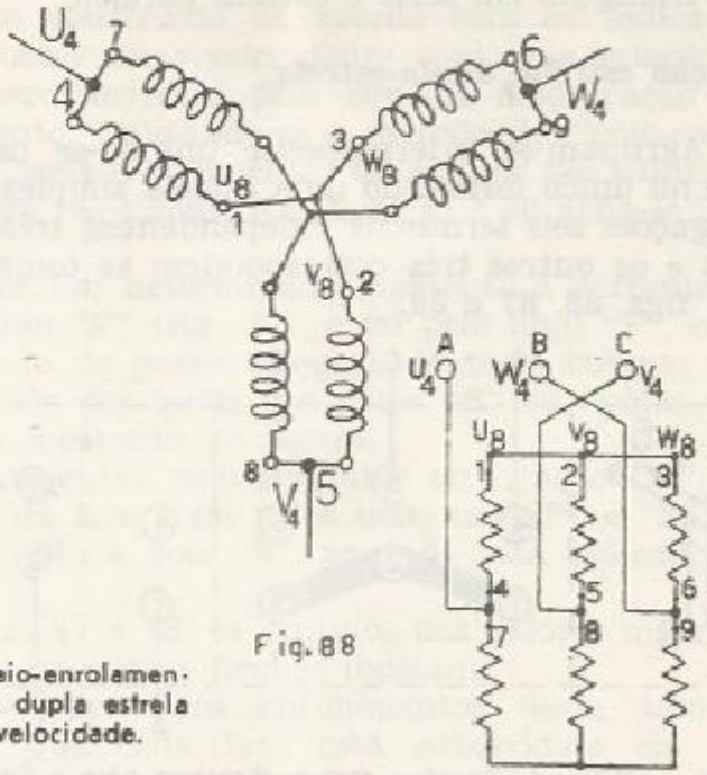


Fig. 88

Fig. 88 — Os 6 meio-enrolamentos são ligados em dupla estrela para a maior velocidade.

O enrolamento assim disposto poderá ser alimentado de duas formas diferentes:

1º Deixam-se livres os terminais U_4, V_4 e W_4 das ligações dos meio-enrolamentos e conectam-se à linha os terminais ou princípios das fases U_8, V_8 e W_8, fig. 87, obtendo-se assim o agrupamento das fases em estrela-série para o maior número de pólos ou a menor rotação;

2º Unindo-se os princípios das fases U_8, V_8 e W_8 se forma uma dupla-estrela ou estrela-paralelo e, lingando-se à rede os terminais U_4, V_4 e W_4, fig. 88, obtém-se o menor número de pólos e por conseguinte a velocidade mais alta.

O conjugado básico varia aproximadamente com o quadrado da velocidade.

Nas figs. 89 e 90, está representado o esquema completo do motor trifásico de duas velocidades, para 4 e 8 pólos, sobre um núcleo de 36 ranhuras, podendo-se verificar que as fases estão agrupadas internamente em estrela para se poder formar desta maneira a ligação estrela-série e estrela-paralelo.

A fig. 91, mostra o diagrama de princípio do enrolamento das figs. 89 e 90.

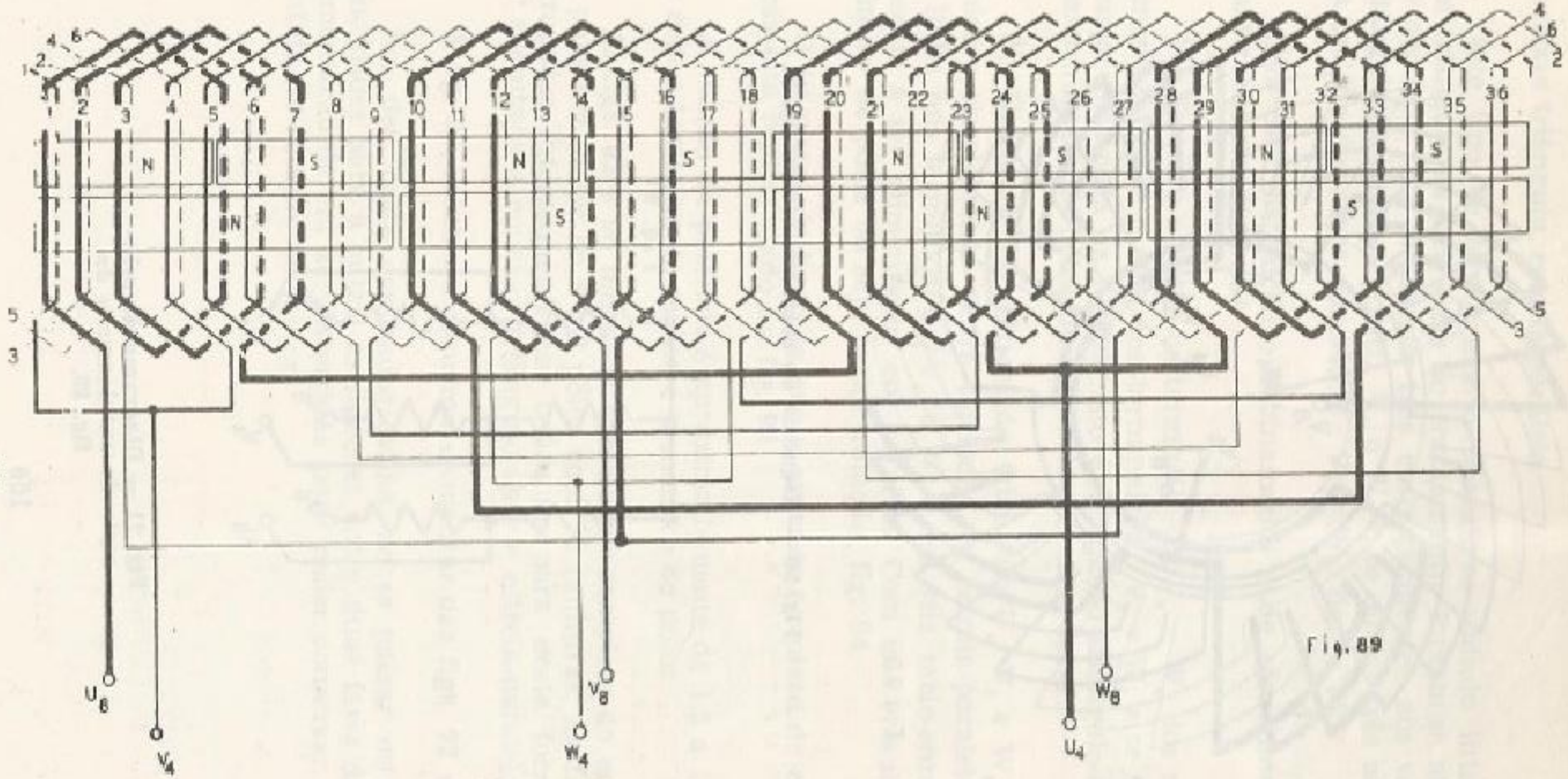


Fig. 89

Fig. 89 — Enrolamento tipo Dahlander, internamente as fases estão agrupadas em estrela.

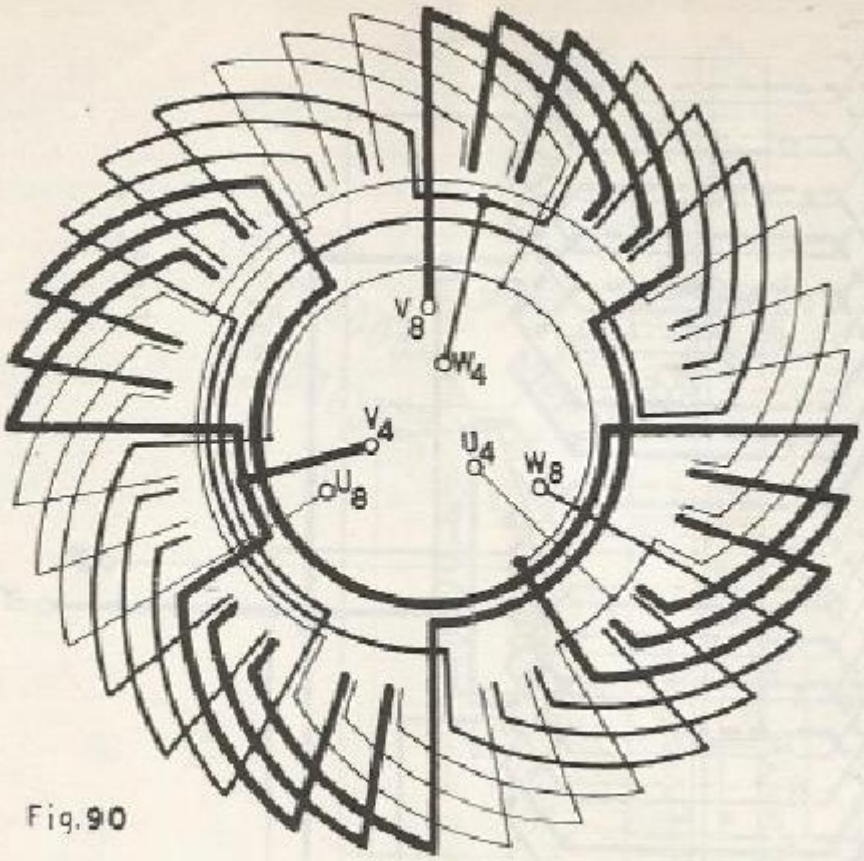


Fig. 90 — Esquema do bobinamento da fig. 89.

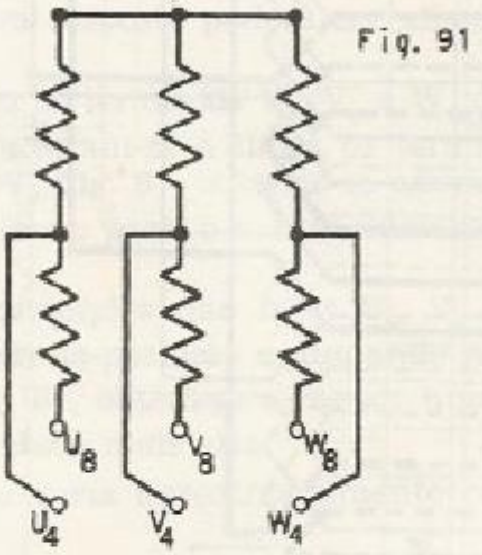


Fig. 91 — Diagrama de princípio do enrolamento da fig. 89.

Conexão triângulo, estrela-paralelo.

Este tipo de agrupamento executa-se unindo internamente em triângulo as três fases do enrolamento. Puxam-se até à caixa de conexões seis terminais, três correspondentes aos vértices do triângulo designados por U_8, V_8 e W_8 e, os outros três às tomadas da metade das fases que são U_4, V_4 e W_4, figura 92.

Com esta disposição o bobinamento pode ser alimentado de duas maneiras distintas.

1º Ficando abertos os terminais U_4, V_4 e W_4 dos meio-enrolamentos, liga-se a rede nos terminais U_8, V_8 e W_8 e se tem a disposição mostrada na fig. 93, isto é, a ligação triângulo-série para maior número de pólos ou a velocidade mais baixa.

2º Unindo-se os vértices do triângulo U_8, V_8 e W_8 num nó único o enrolamento ficará formado em estrela-paralelo. Liga-se a linha nos terminais U_4, V_4 e W_4 e, os seis meio-enrolamentos passam a ser alimentados em paralelo. Com isto, resulta menor número de pólos ou seja maior rotação, fig. 94.

O diagrama de ligações que é gravado na placa de características está representado na fig. 95.

A relação da potência é aproximadamente de 1,5 a 1,8, segundo seja o tamanho do motor e o número de pólos.

As figs. 92 e 96 mostram o esquema completo do enrolamento para um motor de 4 e 8 pólos com 36 ranhuras. As fases estão agrupadas internamente em triângulo para desta forma poder ser executada a conexão triângulo-série e estrela-paralelo.

A fig. 97, mostra o esquema elementar das figs. 92 e 96.

Nos dois casos explicados acima, ao se passar de uma das polaridades para a outra, as ligações entre duas fases da rede de alimentação devem ser invertidas para poder conservar o mesmo sentido na rotação do motor.

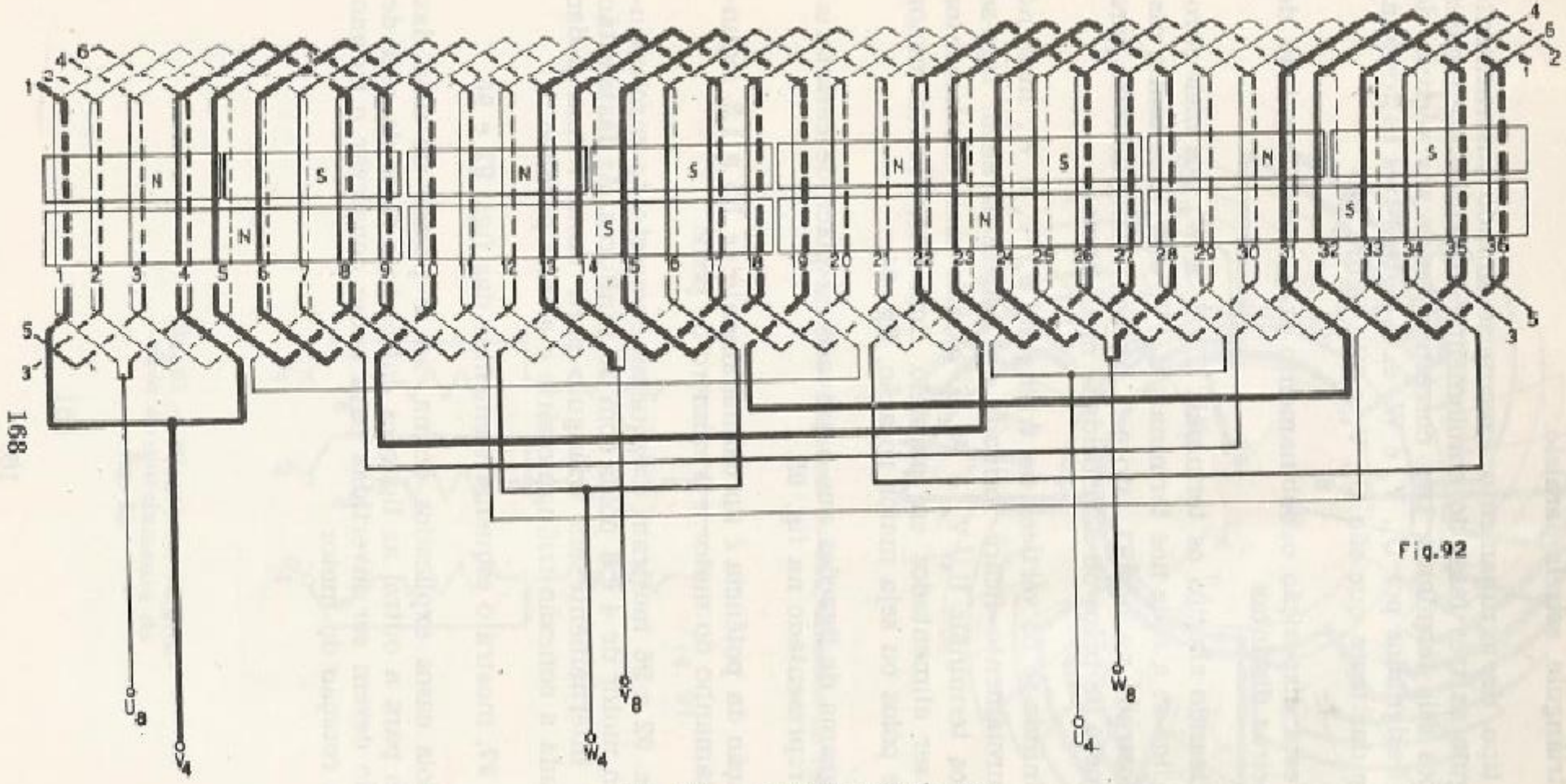


Fig.92

Fig. 92 — Bobinamento de um motor trifásico para mudança de pólos. Internamente está ligado em triângulo.

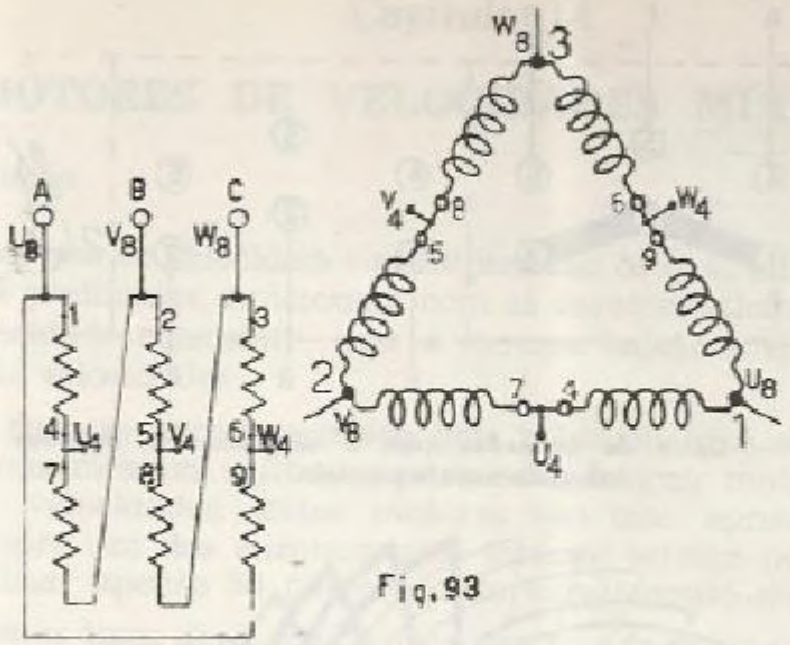


Fig. 93

Fig. 93 — Bobinamento tipo Dahlander em ligação triângulo-série.

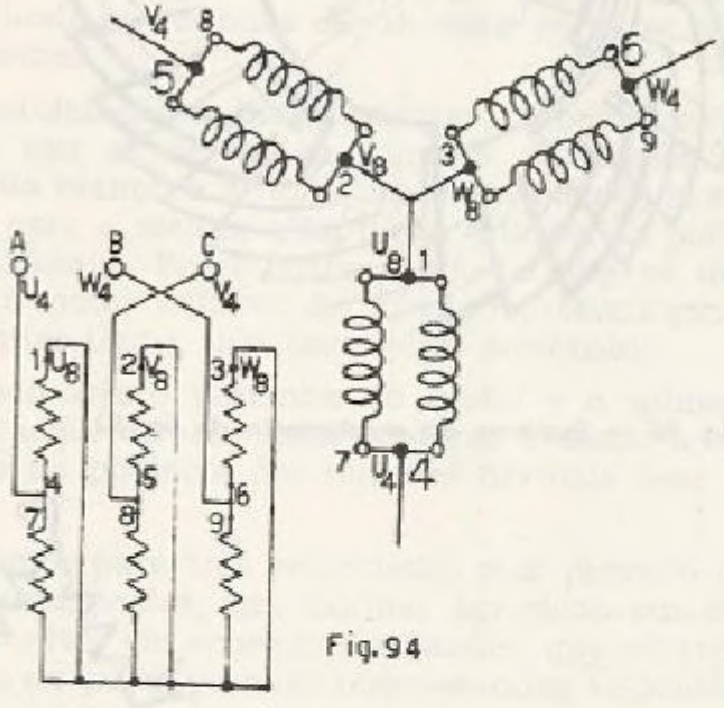


Fig. 94

Fig. 94 — Enrolamento estrela-paralelo para o menor número de pólos.

Fig.95

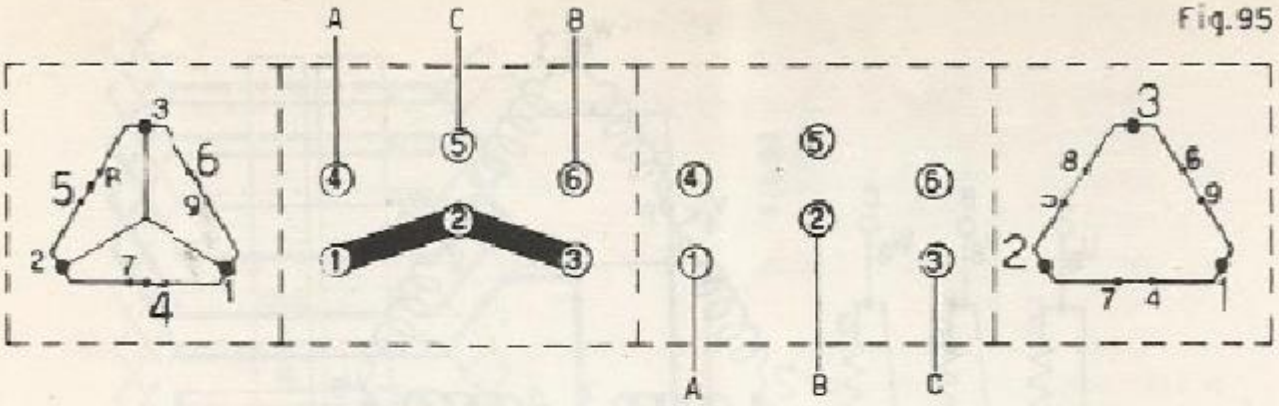


Fig. 95 — Caixa de conexões com o diagrama de ligações: triângulo-estrela-paralelo.

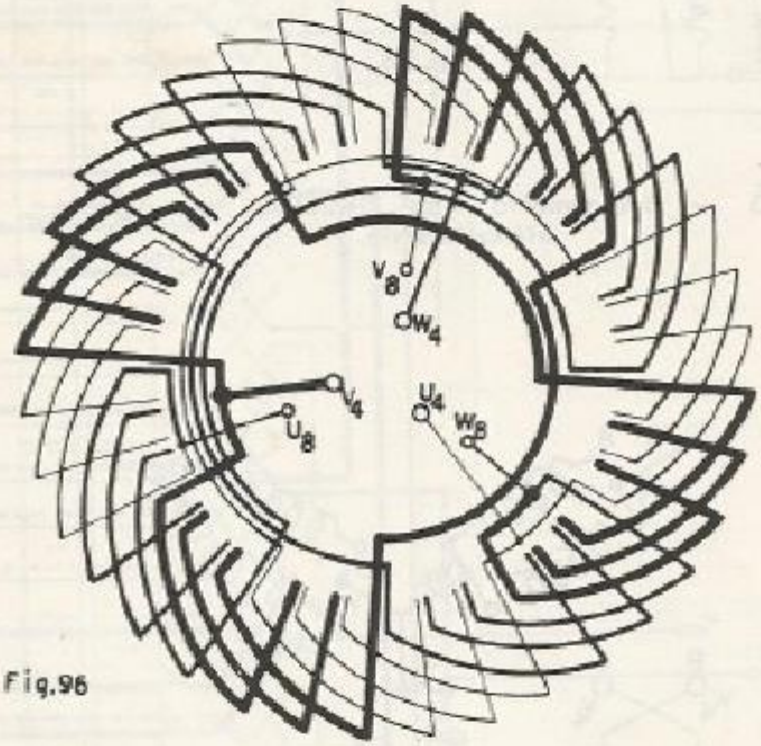


Fig.96

Fig. 96 — Esquema do enrolamento da fig. 92.

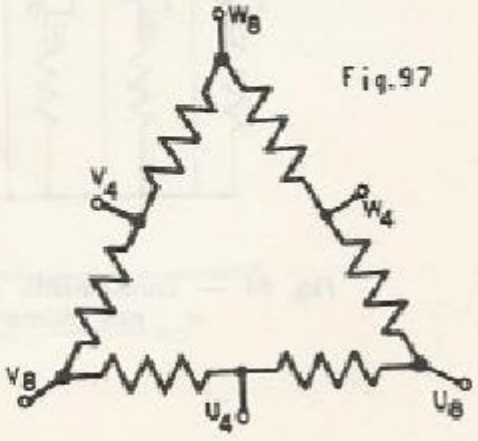


Fig.97

fig. 97 — Diagrama elementar do bobinamento da fig. 92.

Capítulo 14

MOTORES DE VELOCIDADES MÚLTIPLAS

Introdução.

Motores de velocidades múltiplas são os que, em diversas velocidades prefixadas, funcionam com as características de um motor de velocidade constante, com a mesma tensão e freqüência para todas as velocidades.

É comum encontrarem-se dois bobinamentos separados colocados nas mesmas ranhuras para se conseguir motores de três a quatro velocidades. Estes motores são mal aproveitados, como há sempre um dos enrolamentos fora de serviço pode-se de cada vez utilizar apenas 50 por cento do enrolamento do estator.

Nestes tipos de enrolamentos têm que se sujeitar a certas limitações para se obter a segurança que os motores hão de funcionar satisfatoriamente. Os fatores mais importantes são: a correlação e a influência recíproca de ambos os enrolamentos, relação de potência, diferenças da reatância de dispersão e ventilação, produção de ruídos, etc.

Devido a diferentes dispersão e ventilação, os enrolamentos colocam-se geralmente de forma que o de menor número de pólos fique no fundo da ranhura e, o de mais pólos ou baixa rotação, na parte de cima.

Os enrolamentos independentes oferecem as melhores condições no que se refere ao número de bornes necessários na aplicação da manobra automática. Esta faculdade é de capital importância para a melhor adaptação a distintas potências e condições de arranque. Entre outras, estas vantagens têm dado condição a que o motor trifásico de pólos comutáveis com enrolamentos independentes tenha tido uma geral aceitação.

Segundo seja o tamanho do motor e o número de pólos, a potência exeqüível com estes motores é desde a metade, até os dois terços da potência dos motores normais com uma só velocidade.

Um motor para três velocidades está previsto com dois enrolamentos superpostos, um normal agrupado em estrela internamente e outro em conexão Dahlander, que através de mudança do número de pólos permite obter-se duas velocidades diferentes.

Assim por exemplo, a fig. 98, mostra o esquema de um motor de 4, 6 e 8 pólos que dispõe de um estator com dois enrolamentos independentes superpostos, um que se pode trocar suas conexões polares e a razão da velocidade é de 1:2, isto é, para 4 e 8 pólos, e outro com bobinamento normal para 6 pólos.

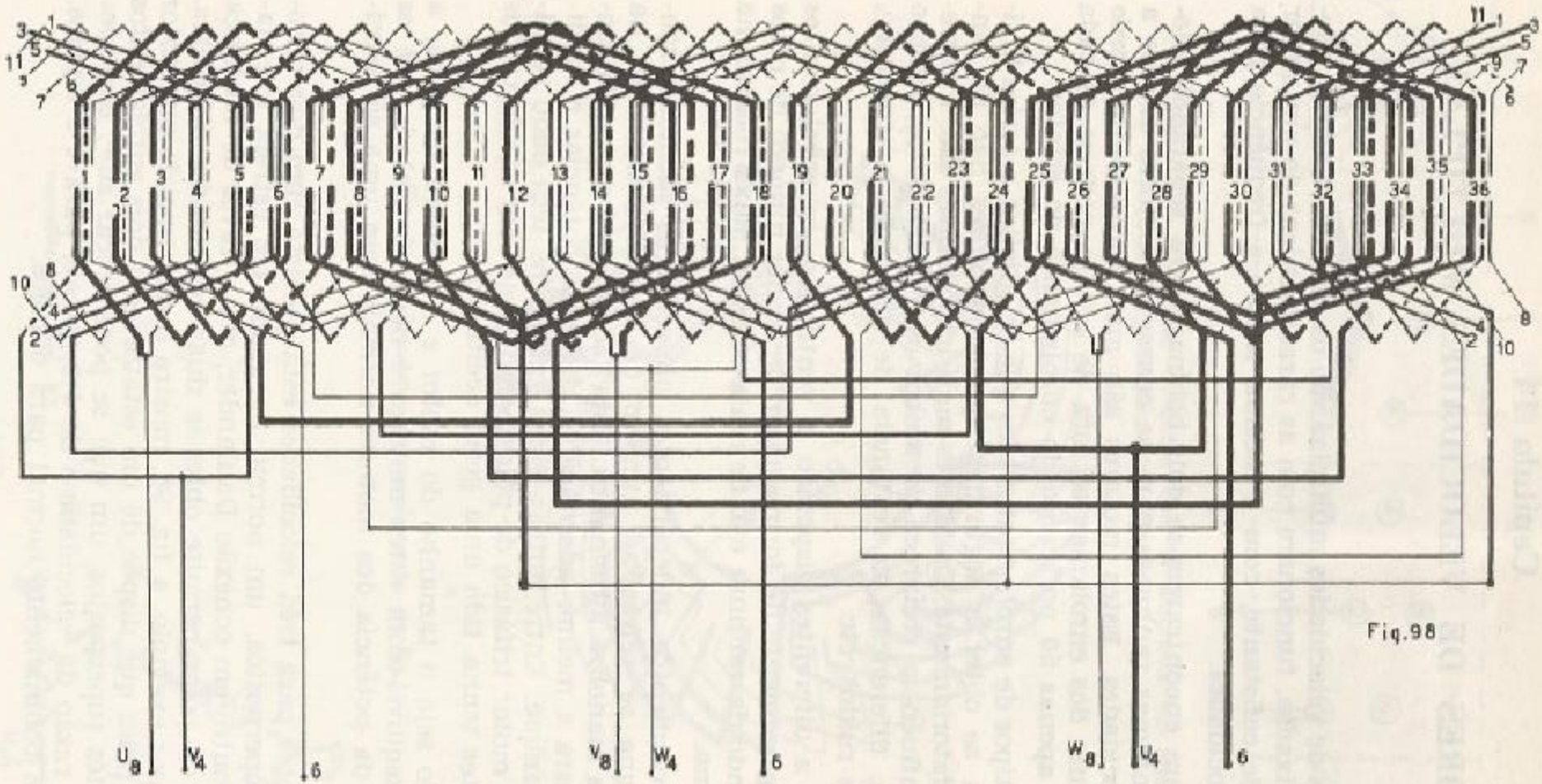


Fig.98

Fig. 98 — Esquema do bobinamento de um motor para três velocidades diferentes, com dois enrolamentos independentes.

Motor de quatro velocidades.

Estes motores têm dois enrolamentos independentes equipados ambos os bobinamentos com a ligação Dahlander, para se poder trocar as polaridades,

Um dos enrolamentos pode ser previsto por exemplo para 2 e 4 pólos e outro bobinamento para 6 e 12 pólos, a fim de se obter quatro velocidades.

MOTORES SINCRONOS DE DUAS VELOCIDADES

Como acontece nos motores assíncronos, nos bobinamentos dos motores síncronos por meio de uma chave apropriada, podem-se variar as conexões do estator para mudar o número de pólos, com isto, muda-se a velocidade de sincronismo do motor e, portanto, a velocidade do rotor.

Quando a razão da velocidade é de 1:2, o método de pólo conseqüente é o mais empregado, porque como já foi dito os dois meio-enrolamentos de cada fase são utilizados em ambos os valores da velocidade.

O diagrama da fig. 99, mostra o esquema do estator de um motor que possui dois enrolamentos independentes com as pontas livres. Dependendo das necessidades onde haja que aplicar o o motor, o bobinamento poderá ser ligado de forma a se obter duas ou mais velocidades com potência constante, ou então conectado para conjugado constante com potência variando na relação das velocidades.

MOTORES DE CORRENTE TRIFASICA COM COMUTADOR (VELOCIDADE VARIAVEL)

Para os acionamentos de grandes potências e velocidade regulável, é empregado preferencialmente o motor trifásico **shunt** de coletor-comutador (idealizado por H. K. Shrage) cuja velocidade pode ser regulada mediante o deslocamento da posição das escovas.

Princípio de funcionamento.

Baseia-se este tipo de motor na posição de uma força contra-eletromotriz de valor regulável e da mesma freqüência que a f.e.m. gerada no enrolamento do rotor.

Este motor de características especiais é composto de duas partes distintas: O estator, que possui um só enrolamento chamado de secundário, é normalmente trifásico idêntico ao dos motores de indução normais. O rotor, que tem dois enrolamentos, um bobinamento primário ou de alimentação, e um segundo enrolamento alojado nas mesmas ranhuras do anterior chamado de regulação. igual aos enrolamentos de máquinas de corrente contínua.

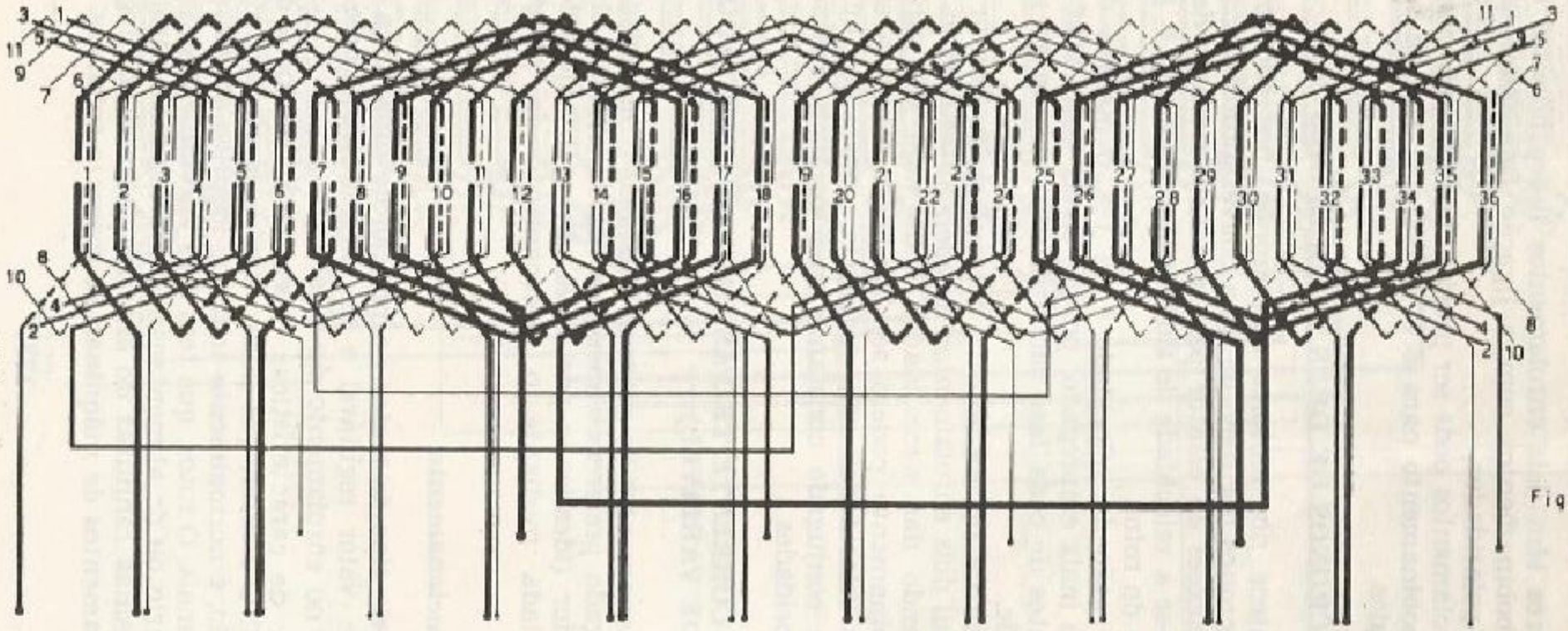


Fig. 99

Fig. 99 — Diagrama do enrolamento de um motor com 36 ranhuras e dois enrolamentos independentes. Todos os grupos de bobinas têm as pontas livres para poder-se efetuar as ligações convenientes, de acordo com as velocidades mais necessárias.

A corrente da rede pode ser fornecida ao estator ou ao rotor. Os motores alimentados pelo estator têm a vantagem de que também se podem fabricar para alta tensão.

Atualmente se emprega a alimentação através do rotor porque resulta mais simples. Neste tipo a corrente da linha chega até o enrolamento primário (normalmente trifásico) do rotor por meio de três anéis coletores com escovas, fig. 100. Este enrolamento produz, no motor, um campo girante e a velocidade deste campo, independente da do rotor, é função apenas do número de pólos e da freqüência, fazendo o mesmo papel que corresponde ao enrolamento estatórico de um motor trifásico comum. O segundo enrolamento do rotor (colocado nas mesmas ranhuras que o enrolamento principal ou primário) denominado de regulação, é ligado às lâminas de um coletor-comutador, sendo semelhante ao de um bobinamento em tambor de C.C.

A função do comutador é fazer com que a freqüência da tensão injetada seja igual à freqüência da tensão induzida.

O enrolamento do estator tem as fases eletricamente independentes, afastadas de (360º/nº de fases) 120º se for trifásico. As pontas opostas de cada fase do estator são ligadas a escovas que se deslizam sobre o coletor-comutador.

As escovas são montadas sobre dois colares porta-escovas que podem se deslocar simultaneamente, mas em sentido oposto de modo a afastar ou aproximar as escovas entre si.

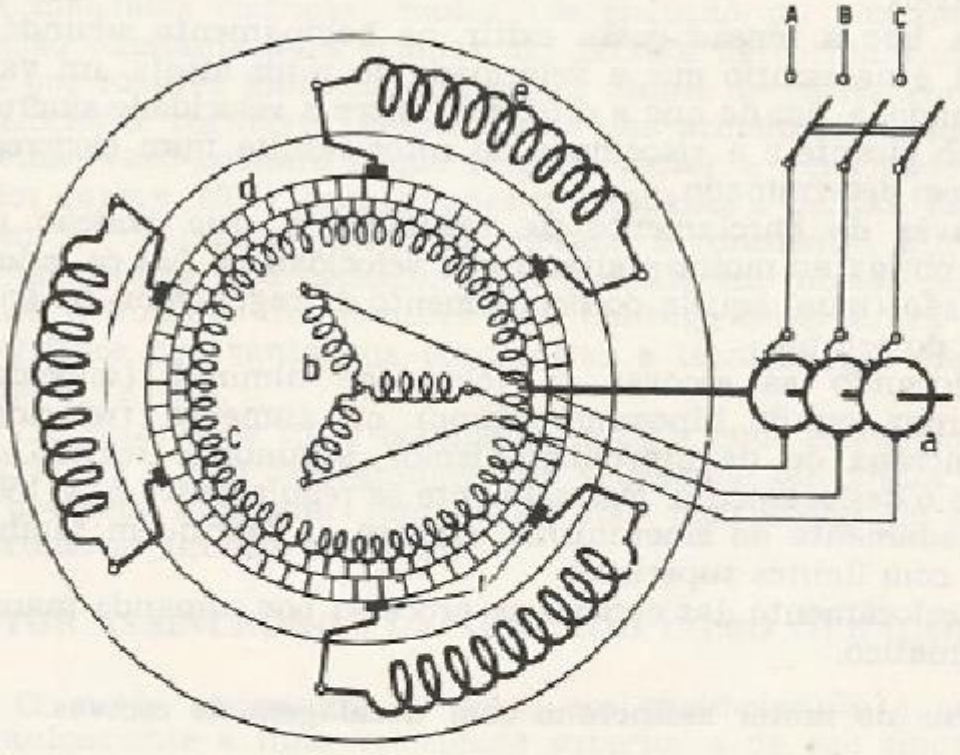


Fig. 100 — Motor de velocidade ajustável, sistema Schrage. a — anéis coletores; b — enrolamento primário (rotor); c — enrolamento de regulação ou auxiliar (rotor); d — coletor-comutador; e — enrolamento secundário (estator); f — par de escovas. A, B e C — linha de alimentação.

A regulação da velocidade efetua-se aplicando uma tensão variável ao enrolamento secundário (estator). Esta tensão é recebida em cada fase por meio de suas escovas através do coletor-comutador.

Dependendo da posição relativa das escovas e de sua diferença de potencial, injeta-se no enrolamento secundário (estator) uma tensão proporcional ao número de espiras do bobinamento de regulação (rotor).

Se as escovas de cada fase se colocam sobre uma mesma lâmina do coletor o enrolamento secundário (estator) estará em curto-circuito, como sucede no motor comum tipo gaiola de esquilo, a tensão injetada será nula, o rotor girará com a velocidade de sincronismo com pequeno deslizamento (3 a 6% aproximadamente, como acontece nos motores de indução normais), o campo ficará fixo e a voltagem entre um par de escovas do comutador serão sempre do mesmo sentido. Como o bobinamento de regulação ligado ao comutador funciona como conversor de freqüência e fonte de tensão injetada, a voltagem entre as escovas é alternada e sua freqüência igual à da linha de alimentação.

Quando as escovas acham-se separadas, uma força contraeletromotriz será obtida do coletor para cada fase. Esta f.c.e.m. pode ser positiva ou negativa, dependendo do sentido em que se movam as escovas. Como esta f.c.e.m. é praticamente independente da carga, a velocidade do motor é independente da carga entre limites razoáveis.

Para que a tensão possa exitir no bobinamento secundário (estator) é necessário que a velocidade do rotor atinja um valor determinado, a fim de que a diferença entre a velocidade síncrona do campo girante e a velocidade do rotor resulte num escorregamento bem determinado.

Através do enrolamento de regulação e pela posição das escovas, obriga ao motor a alterar sua velocidade a fim de induzir uma tensão (igual àquela do bobinamento de regulagem) no enrolamento do estator.

Deslocando as escovas, a velocidade diminui (velocidade sub-síncrona ou de hipossincronismo) ou aumenta (velocidade super-síncrona ou de hipersincronismo), segundo o sentido que se efetue o deslocamento. Normalmente se regula entre 50 e 150% aproximadamente do sincronismo, embora se fabriquem também motores com limites superiores.

O deslocamento das escovas se processa por comando manual ou automático.

Vantagens do motor assíncrono com decalagem de escovas.

Oferece bom conjugado e eficiência. Consegue-se a regulagem de velocidades contínua sem pontos, desde a velocidade nula até a máxima, sempre com alto valor do conjugado, inclusive na partida. Permite obter no eixo uma variação de velocidade que

pode ir desde zero até o dobro da velocidade síncrona ou pouco mais. É auto-regulável, não tem necessidade de sistemas complexos de regulagem externa ao motor como por exemplo, transformador comum ou de regulação variável etc. Não há dissipação de potência em resistências. A partida efetua-se sem qualquer dificuldade e sem aparelhos externos como reostatos, compensadores etc. Em velocidades menores o motor consome menos energia da linha. Tem um rendimento elevado para todas as velocidades, exceto a de sincronismo, e maior rendimento ainda nas velocidades menores. A sensibilidade de resposta ao comando de velocidade é maior que em outros tipos de motores, etc.

A principal desvantagem é seu elevado custo de construção e a relação de velocidade que vai de 1:3 a 1:6 aproximadamente.

Como o conjugado se mantém constante em qualquer posição das escovas, ou seja, em tôda a gama de velocidades, emprega-se com sucesso este tipo de motor em todos os processos onde se exige uma marcha uniforme e regulável, como por exemplo em máquinas de: plástico, tipográficas, borracha, papel, indústria têxtil etc

Sempre que o regime de funcionamento de uma máquina exija possibilidade de variar a velocidade entre limites amplos mantendo constante o conjugado, é preferível o emprego dos motores tipo Schrage ao sistema Ward-Leonard, porque o grupo Leonard é uma solução mais dispendiosa, pois requer no mínimo três máquinas elétricas: motor (de indução ou síncrono) com rotação constante para acionar um gerador de corrente contínua, que por sua vez alimenta um motor **shunt** de corrente contínua e velocidade regulável. Embora uma das principais vantagens do sistema Ward-Leonard é que permite variar a velocidade de um motor (aprox. 20:1) sem grandes dificuldades e perdas. Esta vantagem é contrabalançada pelo elevado investimento inicial que um tal sistema traz consigo, sendo por isto em muitos casos preferível o emprego dos motores tipo Schrage como única solução em virtude das vantagens econômicas e técnicas que eles apresentam.

Os motores de rotor bobinado, embora mais econômicos, têm contra eles o fato da regulagem de velocidade ser obtida a custa da potência dissipada (em calor) nas resistências de controle inseridas no circuito do motor.

MOTOR ASSÍNCRONO FUNCIONANDO COMO GERADOR

O motor assíncrono de rotor em curto-circuito é acionado mecanicamente a uma velocidade superior a de seu sincronismo (hipersincronismo), como por exemplo no caso de um trem elétrico movido por um motor assíncrono. Ao funcionar por uma grande descida encosta abaixo, o trem começa a impulsionar a velocidade do motor que primeiramente torna-se igual à veloci-

dade de sincronismo e a corrente no rotor se anula; depois gira com uma velocidade superior à de sincronismo e o deslizamento da fase passa a ser negativo. Como agora está girando mais depressa que o campo, o sentido do movimento do enrolamento do rotor em relação ao campo se inverte, e os condutores, neste caso, cortam o fluxo do campo em sentido contrário. Em conseqüência, as correntes do rotor, por sua vez, estão invertidas em relação ao sentido que tinham quando funcionava (como motor) com a velocidade menor do que a velocidade síncrona. O binário, que era um conjugado motor, passa a ser um conjugado resistente, e as correntes do rotor geram no estator correntes aproximadamente a 180° fora de fase em relação a corrente que circulava no estator, quando trabalhava como motor; de modo que está agora atuando como gerador e fornecendo energia a linha, ou seja, que quando aplicada ao rotor uma velocidade aproximadamente 4% superior à sua rotação de sincronismo, faz-se a corrente ativa do rotor sofrer uma inversão de fase, mudando a operação do motor para a de gerador, proporcionando assim sua plena potência, devolvendo energia à linha de alimentação, e desta forma alivia o sistema de uma parte de sua carga.

O motor assíncrono pode funcionar como gerador, mas com certas limitações que não tem o gerador síncrono.

A corrente reativa para a magnetização e as perdas no núcleo, são compensadas pela energia da rede de alimentação. A energia necessária para vencer a resistência que o ar oferece ao movimento do rotor, e os atritos, é fornecida por outra forma de energia (mecânica, hidráulica, etc.) que aciona o motor com uma velocidade aproximadamente de 1...4% acima da rotação de sincronismo. Como o estator está ligado a linha de alimentação, trabalha com o campo girante determinado pela freqüência da rede, sendo portanto a freqüência e a voltagem do gerador assíncrono as da linha a qual se acha ligado, qualquer que seja sua velocidade.

Dá-se o nome de gerador assíncrono, porque sua velocidade não se encontra em sincronismo com a freqüência da rede de alimentação. Sua velocidade varia com a carga e não tem uma velocidade definida para uma determinada freqüência.

É empregado o motor como gerador assíncrono: em gruas aproveitando, ao abaixarem-se cargas, para o freiamento; em pequenas centrais hidrelétricas; nos serviços ferroviários que nos declives atua como freio devolvendo energia a rede de alimentação etc.

Do mesmo modo que um gerador síncrono não pode fornecer energia elétrica se não for excitado o seu sistema indutor, também um motor assíncrono ou "gerador assíncrono" que não estiver ligado a um sistema de onde possa retirar a potência reativa necessária para sua excitação, não poderá transformar energia mecânica em elétrica.

Capítulo 15

CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES ASSÍNCRONOS

Introdução.

Como as características dos motores assíncronos, com rotor em curto-circuito, podem ser mudadas variando-se a resistência e a reatância do rotor e outras grandezas elétricas dos seus circuitos, a associação de normas técnicas estabeleceu designações específicas em função da construção do rotor, ou seja, de acordo com a relação que apresentam entre suas correntes de arranque e as de sua marcha normal.

Os motores assíncronos com rotor em curto-circuito são assim, classificados por letras "A", "B", "C", "D", "E" e "F".

Classe A.

Rotor de alta resistência, conjugado de partida normal e corrente de partida também normal, baixo deslizamento.

Classe B.

Tem rotor de baixa resistência, corrente de partida normal, menor escorregamento que todos os rotores em curto-circuito, momento de partida normal. O conjugado máximo de regime e o fator de potência são ligeiramente menores que os da classe "A", baixo deslizamento.

Classe C.

Rotor de dupla gaiola de esquilo, corrente de partida reduzida, poderoso momento de arranque ou alto conjugado de partida, baixo deslizamento.

Classe D.

Apresenta rotor de elevada resistência, conjugado de partida elevado, baixa corrente de partida, maior deslizamento do que nos motores classe "B" e "C" e portanto tem maiores perdas durante a operação normal.

Classe E.

Momento de arranque reduzido, corrente de partida normal, baixo deslizamento.

Classe F.

Conjugado de partida baixo, corrente de partida reduzida, baixo escorregamento.

Rotor bobinado.

Este rotor tem resistências no circuito para proporcionar corrente de partida reduzida e um momento de arranque elevado.

Por meio destas letras é possível determinar a capacidade de corrente dos equipamentos de proteção dos motores, por isto, as normas aconselham aos fabricantes a colocar a letra pela qual é designado o rotor, na placa das características do motor.

Observação.

Considera-se motor de baixo deslizamento aquele cujo escorregamento a plena carga for inferior a 5%. Motor de alto escorregamento é aquele cujo deslizamento a plena carga for igual ou superior a 5%, com exceção dos motores das categorias "A" e "B" com 10 ou mais pólos que podem ter escorregamento a plena carga pouco superior a 5%, sem que por isso devam ser considerados motores de alto deslizamento.

Considera-se corrente de partida alta aquela cujo valor excede os limites fixados para a classe "B".

Aplicações dos diversos tipos de motores de indução.

a) Os motores da classe A são para aplicações gerais. A corrente de partida é 5 a 7 vezes maior que a de placa. O momento de arranque é aproximadamente de 150% do nominal. Estes motores são usados para compressores, bombas, ventoinhas etc.

b) Os motores do tipo B têm um momento de partida que varia entre 100 a 160% do valor de placa, dependendo da potência e velocidade do motor a plena carga. A corrente de partida é aproximadamente 5 vezes maior que a nominal. Estes motores podem ser usados partindo a plena tensão em certas aplicações onde os da classe A obrigariam partida com tensão reduzida. Aplicações típicas: pequenas serras circulares, sopradores centrífugos, ventiladores etc.

c) Nos motores da categoria C a corrente de partida é cerca de 4 vezes a corrente normal. O conjugado de partida tem um valor de aproximadamente 250% do conjugado a plena carga. São os mais adequados para máquinas que requerem um grande conjugado de partida como, por exemplo, esteiras rolantes, betoneiras, britadeiras, pulverizadores, grandes máquinas de refrigeração etc.

d) Os motores designados por D possuem um momento de arranque em torno de 275% do nominal. A corrente de partida é 4,5 a 5 vezes maior que a de placa. São freqüentemente usados onde se quer um forte momento de arranque e uma pequena corrente de partida, como nos motores para estamparia, elevadores, máquinas, ferramentas de grande porte, tesouras etc.

e) Os motores do tipo E e F são de pouca aplicação, sendo usados em certas cargas que exigem pequeno momento de arranque e baixa corrente de partida.

Com o motor de rotor bobinado, associado a um controle adequado, podem ser conseguidas todas as vantagens dos vários tipos de motores de rotor em curto-circuito, porém seu custo é mais elevado. Estes motores são usados onde se requerem um potente conjugado de arranque ou controle da velocidade. Utilizam-se para laminadores, guinchos, guindastes, cargas com grande volante comportas etc.

Todos os modelos de rotores em curto-circuito anteriormente expostos, podem ser empregados para a maioria das cargas que possam ser acionadas por um motor com rotor de gaiola. As características destes motores podem ser mudadas, variando-se o circuito do rotor, proporcionando assim, a possibilidade de ser obtidas as características intermediárias que se desejarem, podendo o técnico projetar o motor com um conjugado e corrente de partida mais adequado para cada caso.

TEMPERATURA ADMISSÍVEL DOS MOTORES ELÉTRICOS

A potência de um motor é limitada pelo calor resultante das perdas nos enrolamentos e no ferro ativo. A temperatura tolerável de uma máquina está limitada pela resistência ao calor dos materiais isolantes, assim como pelo sistema de refrigeração do motor. Na prática, o valor da carga que o motor pode suportar de um modo contínuo é limitado somente pela elevação admissível de temperatura, na qual o motor pode funcionar sem prejudicar seu isolamento

Devido a diferenças na dissipação do calor, as diversas partes do enrolamento de um motor não trabalham a uma mesma temperatura. A temperatura no centro de uma bobina é muito maior que na superfície. Este ponto central da bobina é denominado "ponto mais quente" e a temperatura neste ponto é chamada "temperatura do ponto mais quente", comumente abreviada para "temperatura do ponto quente". É a temperatura do ponto quente que se utiliza para estabelecer a faixa de serviço de um sistema isolante. Esta temperatura é a soma de todos os fatores que produzem calor no enrolamento do motor, porque acima da temperatura máxima permissível os materiais isolantes perdem sua rigidez mecânica e elétrica.

Divisão dos motores em diversas classes de isolamento.

As indicações da classe ou do tipo de isolamento empregado são expressas na placa do motor.

A tabela com as temperaturas que os isolamentos resistem acima da temperatura ambiente (40°C) e as temperaturas máximas em que podem funcionar as diversas classes básicas de isolamento é a seguinte:

TEMPERATURA

CLASSE	Elevação Permissível acima dos 40 °C	Máxima Permissível
C	50 °C	90 °C
A	65 "	105 "
E	80 "	120 "
B	90 "	130 "
F	115 "	155 "
H	140 "	180 "
C	Sem limite estabelecido	

Como decorre um tempo considerável até que o motor adquira sua temperatura final, deduz-se que, no que concerne à temperatura, os motores elétricos podem suportar momentaneamente cargas que excedem bastante as cargas contínuas admissíveis.

Todo motor deverá funcionar satisfatoriamente com sua potência e freqüência de placa, a qualquer tensão não mais de 10% acima ou abaixo da tensão especificada, porém não necessariamente dentro do acréscimo de temperatura previsto. Em outras palavras, eles puxarão sua carga total dentro de uma temperatura segura.

A vida do enrolamento e do isolamento dependem em grande parte da temperatura interna do motor.

CONDIÇÕES USUAIS DE SERVIÇO DOS MOTORES ELÉTRICOS

As condições usuais de serviço aprovadas por norma são: meio refrigerante de temperatura não superior a 40 °C e isento de elementos prejudiciais ao funcionamento do motor, localização à sombra e altitudes não superiores a 1000 metros.

O emprego de motores em meio refrigerante cuja temperatura exceda 40°C, ou exposto diretamente ao Sol, ou altitudes superiores a 1000 metros, deverá ser considerado como especial.

FUNCIONAMENTO DOS MOTORES TRIFÁSICOS COM CORRENTE MONOFÁSICA

Os motores construídos normalmente para funcionar em corrente trifásica podem operar também como motores monofásicos.

Porém a potência do motor trifásico ao operar com corrente monofásica fica reduzida.

Ligando um capacitor ao motor trifásico pode este trabalhar com corrente monofásica (fase e neutro). Conectando o capacitor a uma das fases do motor consegue-se uma defasagem de 90°, necessária para criar o campo girante, e o motor arrancará com corrente monofásica. A capacidade do capacitor tem grande importância para as boas condições de funcionamento do motor. Com um capacitor adequado pode-se conseguir uma potência com corrente monofásica, do 80% aproximadamente da potência nominal do motor trifásico e, 40% do binário de arranque.

A capacidade do capacitor depende da tensão de serviço, da potência do motor, do conjugado de partida e do fator de potência.

MOTORES DE INDUÇÃO BIFÁSICOS

Os motores de indução de duas fases são semelhantes aos trifásicos. O estator bifásico possui dois enrolamentos espaçados de 90°. Se as tensões estiverem defasadas de 90° os dois campos magnéticos combinam-se de modo que o resultado será de uma rotação completa para cada ciclo de C.A.

Os motores bifásicos se diferenciam dos trifásicos unicamente no número de grupos e em sua ligação. O mesmo que nos motores trifásicos, o número de grupos é igual ao número de fases multiplicado pelo número de pólos, fórmula 29.

Num motor bifásicos tetrapolar com 24 bobinas, o número de grupos será igual a:

$$2 \text{ fases} \cdot 4 \text{ pólos} = 8 \text{ grupos}$$

O número de bobinas por grupo (fórmula 30) é igual a:

$$B_1 = \frac{24 \text{ bobinas}}{8 \text{ grupos}} = 3 \text{ bobinas por grupo.}$$

Ligam-se as bobinas do motor bifásico para que resultem dois enrolamentos perpendiculares entre si, usando-se alimentações defasadas de 90º (fases A e B) no lugar de três bobinamentos com alimentações defasadas de 120º como acontece nos motores trifásicos.

A conexão dos grupos dos motores bifásicos representam-se nas figuras 101 e 102. Nos diagramas de ligações duas flechas consecutivas assinalam o "sentido dos ponteiros do relógio" e duas flechas seguintes no sentido "contrário aos ponteiros do relógio".

Em semelhança aos trifásicos, nos motores bifásicos, seja qual for o número de pólos, é necessário que os pólos consecutivos sejam de polaridade contrárias. As ligações de todos os grupos da mesma fase se fazem de maneira tal, que a corrente circule em um grupo num sentido e no grupo seguinte em sentido contrário.

Observe-se que a ligação da fase A é igual ao bobinamento principal ou de trabalho de um motor monofásico, e a conexão da fase B equivale ao do enrolamento auxiliar ou de partida do dito motor monofásico. Porém, no motor bifásico não existe interruptor automático e os dois enrolamentos operam continuamente com a tensão da rede.

Um motor bifásico precisa aproximadamente uns 25% a mais de espiras que um motor trifásico de igual potência, para a mesma tensão, por isto os motores bifásicos se transformam às vezes em trifásicos, por resultar assim de funcionamento mais econômico.

Os motores bifásicos são muito pouco empregados, sendo praticamente inexistentes os de várias velocidades.

Fig.101

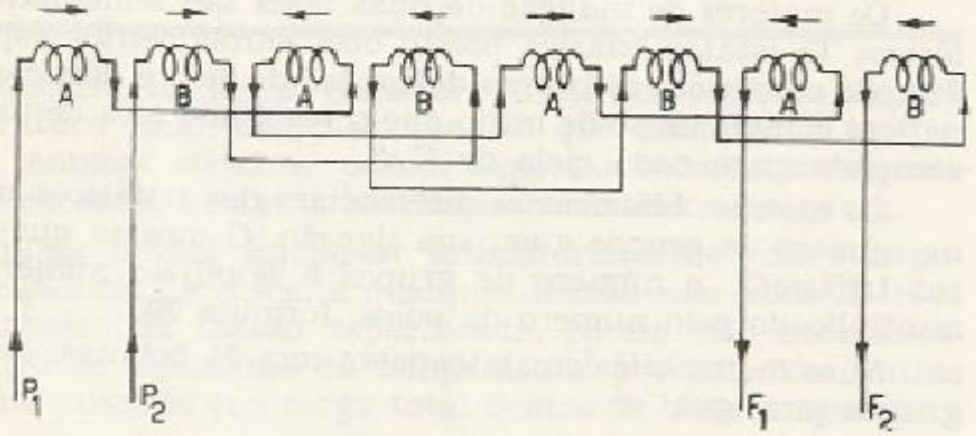


Fig. 101 — Enrolamento de um motor bifásico-tetrapolar.

Fig.102

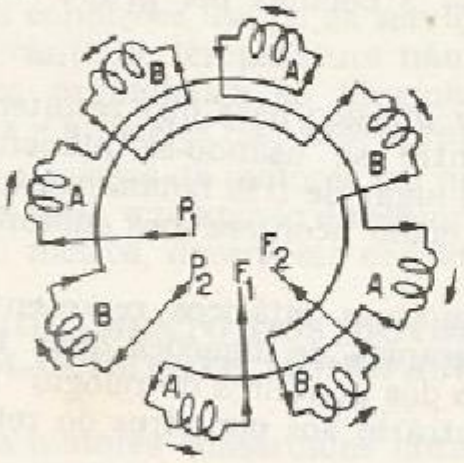


Fig. 102 — Bobinamento em ligação série de um motor bifásico de quatro pólos, oito grupos de bobinas.

Capítulo 16

MOTORES MONOFÁSICOS

Introdução

Quando se interrompe uma das fases de um motor trifásico, enquanto ele está girando, este continua a funcionar como motor monofásico suportando a carga, ainda que a menor velocidade. Entretanto, se o motor estiver parado, não poderia arrancar porque lhe faltaria o campo magnético rotativo e não teria partida automática. Para que o motor possa funcionar é necessário fazer o arranque por algum meio exterior, e então, a reação do rotor, provoca o nascimento de um campo magnético rotativo.

Assim como o motor trifásico não arranca sozinho quando lhe falta uma fase, um motor monofásico para ser posto em marcha precisa também utilizar-se de um dispositivo auxiliar.

Quando se aplica uma f.e.m. monofásica ao estator de um motor monofásico, origina-se uma corrente magnetizante que gera um campo magnético alternado na direção do eixo do enrolamento. Este campo não é girante porque os binários-motores atuam em sentidos opostos e não há momento de arranque para fazer o rotor girar automaticamente.

Em virtude do motor monofásico não arrancar por si próprio, necessita por isso de algum meio auxiliar para a partida. Nestas condições, o motor continuará a girar desenvolvendo um conjugado próprio, ajudado pela inércia do rotor, no sentido de rotação, em que se lhe aplique o impulso de arranque.

Normalmente os meios auxiliares para o arranque, consistem em introduzir no estator um enrolamento auxiliar independente, ligado em paralelo ao bobinamento principal.

Motor de fase auxiliar ou de fase dividida

A defasagem entre os enrolamentos, principal e auxiliar, é obtida com o uso de um condensador, uma indutância ou uma resistência em série com o interruptor automático e o enrolamento auxiliar, este opera somente durante a partida simulando uma segunda fase.

O campo magnético produzido pelo enrolamento auxiliar, combinado com o campo principal, cria um campo girante. Pela conhecida ação entre um campo magnético e uma corrente elétrica, produzem um binário (conjugado) que faz o rotor girar. Para o arranque (como já foi dito) são necessários ambos os campos, mas basta um só para a marcha, de forma que quando o motor se aproxima da plena velocidade, um interruptor automático desliga o enrolamento auxiliar ou de partida.

Enrolamentos monofásicos

Em princípio, os bobinamentos de motores monofásicos com enrolamento auxiliar poderiam ser executados em qualquer um dos tipos estudados para os motores polifásicos. Porém, na prática, se constroem normalmente do tipo concêntrico, porque têm a vantagem de: uma construção mais simples, maior adaptação às exigências de cálculo; possibilidade que os enrolamentos, principal e auxiliar estejam constituídos por distintos número de espiras, assim como que sejam diferentes as seções dos condutores, conseguindo-se com isto valores convenientes para as resistências e reatâncias dos enrolamentos, etc.

Freqüentemente empregam-se enrolamentos de duas camadas nos motores monofásicos, com a finalidade de melhorar suas características. A redução do passo não se faz a 1/5 aproximadamente da divisão polar como nos bobinamentos trifásicos; no enrolamento monofásico faz-se a 1/3 aproximadamente.

Disposição relativa dos enrolamentos

Os dois enrolamentos, principal e auxiliar, de um motor monofásico, podem estar separados ou superpostos.

Em um enrolamento separado, o bobinamento auxiliar, ocupa ranhuras diferentes das ocupadas pelo enrolamento principal, isto é, em nenhuma ranhura se encontram condutores que pertençam aos dois enrolamentos.

Num bobinamento superposto, algumas bobinas auxiliares estão colocadas em ranhuras ocupadas, parcialmente, por bobinas principais, com o que se consegue além de uma melhor distribuição do enrolamento, melhores características de funcionamento do motor. Por estas razões, é quase que exclusivamente o tipo de enrolamento adotado.

O enrolamento auxiliar deve ter menos espiras e fio mais fino que o enrolamento principal, sendo aquele, geralmente, enrolado sobre este que tem maior número de espiras e fio de maior seção, ou seja, o enrolamento auxiliar é colocado perto do topo das ranhuras do núcleo do estator, e o de serviço (principal) no fundo.

Para trabalhar em duas tensões são mais empregados os motores monofásicos de quatro pólos, conectados em série ou em série-paralelo.

O tamanho de um motor monofásico é aproximadamente 1,5 vezes maior que o de um motor polifásico da mesma potência e do mesmo número de rotações, tendo fator de potência mais baixo e meror rendimento que o polifásico.

Motor série

Este motor é conhecido como motor universal e é construído como um motor série de C.C., embora sejam precisas algumas modificações para funcionar satisfatoriamente em C.A. Tem grande variação de velocidades entre o funcionamento a plena carga e a marcha em vazio.

O motor série monofásico de C.A. é quase que o único motor de tamanho grande empregado na tração elétrica. O binário de partida e as características de velocidade são adequadas para esse serviço. A velocidade regula-se variando a tensão aplicada ao motor.

Para inverter o sentido de rotação trocam-se as ligações, ou só do estator, ou só do rotor.

Os motores série, assemelham-se muito quanto a estrutura, funcionamento e características de rotação aos motores de corrente contínua.

Motor síncrono monofásico

Existem vários tipos de motores síncronos monofásicos, e como o motor trifásico síncrono, o motor monofásico não arranca automaticamente, por isso utiliza os mesmos princípios para o arranque, que os utilizados nos motores de indução monofásicos. Geralmente têm autopartida mediante indução-reação, divisão de fase etc.

O motor monofásico síncrono funciona sem qualquer corrente de excitação. Seu fator de potência é baixo, geralmente, só se empregam, em pequenas capacidades, devido ao seu reduzido conjugado síncrono.

Arranque dos motores de indução monofásicos

Há vários métodos de arranque do motor de indução monofásico que visam melhorar o funcionamento. Os mais empregados são por: capacitor, resistor, pólo auxiliar ou método de pólo com retardamento parcial etc.

Partida do motor de indução monofásico com pólo auxiliar

O motor de indução de pólo auxiliar, chamado por alguns autores bobina de arrastamento, retardamento parcial, bobina de sombra, pólo sombreado, pólo dividido, pólos fantasmas, pólos amortecedores, campo distorcido, etc.; é um motor de indução monofásico com rotor de gaiola sem precisar do enrolamento auxiliar. Em torno de uma seção de cada massa polar coloca-se um sólido anel de cobre ou espira em curto-circuito chamada de bobina de arrastamento, que reage sobre o campo principal produzindo um conjugado de partida, permitindo que o motor possa partir por si mesmo.

O sentido de giro do motor é determinado pela posição física do anel envolvente ou espira de cobre em curto-circuito. Para inverter a rotação é preciso desmontar o motor e dar ao estator um giro de 180º geométricos (ou passar o anel para o outro lado do pólo).

Motores de repulsão

Estes motores dividem-se em três grupos principais: motores com partida por repulsão e acionamento por indução; motores de repulsão propriamente ditos; motores de repulsão-indução.

a) No motor com partida por repulsão e acionamento por indução ou de "levantamento de escovas", a energia flui no enrolamento do rotor através das escovas ligadas em curto-circuito, as quais estão em contato com o comutador.

Quando o motor atinge uma velocidade predeterminada um dispositivo centrífugo levanta as escovas do comutador e coloca os segmentos e o enrolamento do rotor em curto-circuito, passando a funcionar como os motores de indução.

b) O motor de repulsão propriamente dito arranca e marcha pelo princípio de repulsão. Neste tipo de motor as escovas permanecem constantemente sobre o comutador, e não possui mecanismo centrífugo. Tem um forte conjugado de arranque e é construído com características de velocidade variável.

c) O motor de "repulsão-indução" tem o rotor bobinado como o de C.C. e, ainda, debaixo deste enrolamento tem outro em gaiola de esquilo. Arranca pelo princípio de repulsão (criando pólos que são repelidos por pólos semelhantes do estator) e continua funcionando numa combinação dos princípios de repulsão e indução. Não tem mecanismo centrífugo, e as escovas ficam permanentemente em contato com o comutador.

Interruptores automáticos para o enrolamento auxiliar

O interruptor automático destina-se a desligar o enrolamento auxiliar logo que o motor atinja uma velocidade próxima da nominal, conforme já foi dito.

Existem vários tipos de interruptores automáticos, sendo que os mais comuns são os térmicos, os magnéticos e os centrífugos. Os dois primeiros normalmente se instalam nas proximidades dos motores e não fazem parte de seu conjunto. Os interruptores centrífugos são montados no interior dos motores e fazem parte do conjunto.

Onde não é possível empregar um interruptor centrífugo, utiliza-se para o mesmo efeito um relé. Os relés para o processo de arranque funcionam com a corrente procedente do bobinamento principal. Estando o motor parado, o relé mantém ligado o

circuito auxiliar. À medida que as rotações do motor se aproximam do ponto em que o enrolamento principal desenvolve o conjugado de partida, essa corrente vai diminuindo e quando é insuficiente para manter o relé fechado, abre-se êste relé, desligando o enrolamento auxiliar.

Inverte-se a rotação do motor invertendo-se as ligações do enrolamento de partida.

Denominação dos terminais de um motor monofásico

Nos enrolamentos monofásicos, as pontas do enrolamento que representam princípio e fim do bobinamento principal e do enrolamento auxiliar são denominadas da seguinte forma:

Enrolamento principal U — V ou T1 — T2; bobinamento auxiliar W — Z ou T5 — T6, normalmente estes quatro terminais são conduzidos para fora do motor e dispostos na caixa de bornes.

Motores monofásicos de várias velocidades

Os motores monofásicos de várias velocidades são geralmente de uma só tensão, porque dupla voltagem e dupla velocidade resultariam em um número excessivo de terminais.

Em determinados tipos de motores monofásicos de duas velocidades emprega-se o método do "pólo conseqüente" ou mudança do número de pólos, para as diferentes velocidades.

Nos motores de fase dividida, cada velocidade requer um enrolamento separado. Em alguns tipos usa-se também a combinação de dois enrolamentos apenas para se obter três velocidades. O funcionamento em carga é semelhante ao dos motores de uma só velocidade.

Um motor monofásico enrolado como trifásico e fechado em estrela, alimentado por corrente monofásica, pode funcionar com várias velocidades. Nestes motores, uma das fases leva várias bobinas enroladas com um fio especial de alta resistência, obtendo-se assim um defasamento elétrico entre os enrolamentos por meio de impedâncias desiguais entre os bobinamentos; outra das fases é ligada em série com uma reatância que tem diversas tomadas para a regulação da velocidade; a terceira fase é conectada diretamente à rede de alimentação monofásica. A resistência e a reatância criam um campo magnético rotativo que causa a rotação do rotor.

Outro método para se obter várias velocidades consiste no emprego de um autotransformador, que, por sua vez, serve para produzir uma defasagem da corrente no enrolamento de partida. O primário do transformador tem um certo número de derivações na linha de alimentação e a velocidade é ajustada alternando-se a tensão aplicada ao motor ou ao seu enrolamento principal.

Motores de alta rotação

Atualmente estão sendo construídos motores de indução de rotor em curto-circuito (mais baratos, mais robustos e de manutenção menor que os motores universais), que trabalham a alta rotação, cujo funcionamento é perfeitamente seguro apesar do rotor girar com altíssima velocidade, graças ao aumento da freqüência da corrente (50-60 Hz para 1250-1800 Hz ou mais) obtido com o conversor de freqüência de indução.

Conversor de freqüência de indução

Este tipo de conversor é constituído praticamente por dois motores de indução. Um motor assíncrono de rotor em curto-circuito e, acoplado a seu eixo, uma máquina (com números de pólos diferentes) semelhantes a um motor de indução de rotor bobinado, que constitui o conversor propriamente dito.

O funcionamento consiste, em linhas gerais, em forçar o conversor de freqüência (semelhante a um motor de indução com rotor bobinado) a funcionar com deslizamento elevado.

Como se sabe, a freqüência do rotor de um motor de indução é igual ao produto da freqüência do estator pelo deslizamento de fase.

Assim, se o conversor propriamente dito for alimentado com corrente de 60 Hz (estatórica), e acionado com deslizamento igual a 30 a freqüência de saída (rotórica), pela fórmula 12, será de:

$$f_2 = f_1 \cdot S = 60 \cdot 30 = 1800$$

de 1800 Hertz

Emprego dos motores monofásicos

Em tamanhos fracionários, utilizam-se os motores monofásicos de indução mais extensamente que os polifásicos, devido à preponderância da corrente monofásica. Embora os motores monofásicos sejam mais caros que os polifásicos que fornecem a mesma potência, são de controle mais fácil os monofásicos, sendo por isso muitas vezes preferidos, mesmo quando há corrente polifásica disponível.

Esquema do enrolamento de um motor monofásico

A disposição dos dois enrolamentos, principal e auxiliar de um motor monofásico, é esclarecida pelo esquema da fig. 103, o qual mostra o enrolamento de trabalho "ET", sendo "P" o princípio e "F" o final. O bobinamento auxiliar é "BA", sendo "Pa" e "Fa" o princípio e o final respectivamente.

O interruptor automático "IA" é o encarregado de desligar o enrolamento de partida (ou auxiliar).

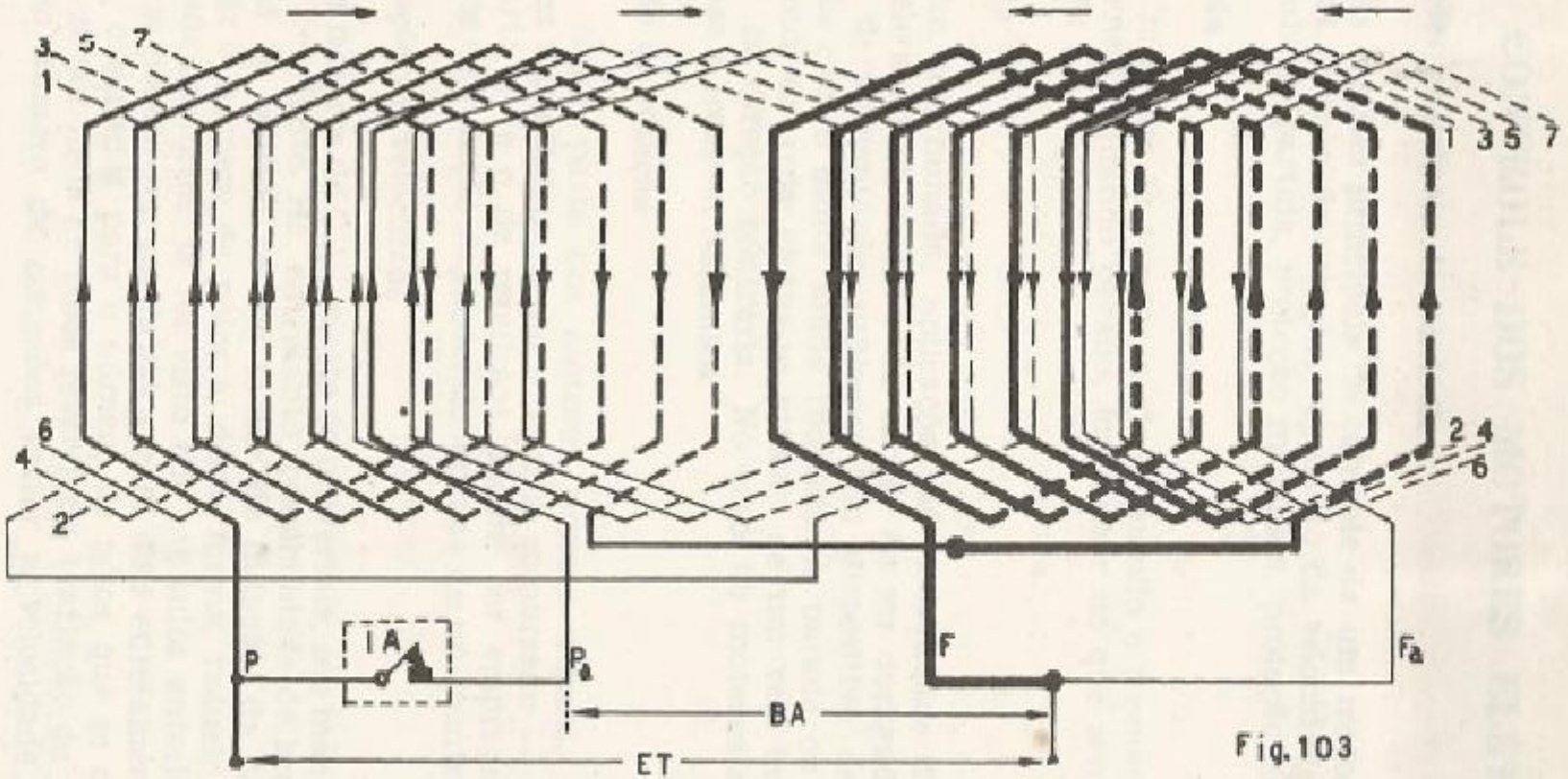


Fig. 103 — Enrolamento principal ou de trabalho «ET» e bobinamento auxiliar «BA» de um motor monofásico.

Capítulo 17

CONTROLE DOS MOTORES ELÉTRICOS

Funções principais do controle

As funções principais do controle de um motor são: partida, parada, direção de rotação, regulação da velocidade, limitação da corrente de partida, proteção mecânica, proteção elétrica, etc.

Partida

Um motor só começa a girar quando o momento de carga a ser vencido, quando parado, for menor do que seu conjugado de partida.

Parada

Em determinadas aplicações há necessidade de uma rápida desaceleração do motor e da carga. Ao ser desligado o motor da linha de alimentação utiliza-se um dispositivo de inversão de rotação com o motor ainda rodando. A parada ou desligamento do motor da rede efetua-se através de um relé impedindo-o de partir na direção contrária. No caso de motores síncronos emprega-se a freagem dinâmica.

Sentido de rotação

A maior parte dos motores (exceto alguns, por exemplo: motores monofásicos, como o de pólo sombreado — anel de cobre em curto — e o de repulsão) podem ser empregados nos dois sentidos de rotação dependendo apenas de um controle adequado.

Regulação da velocidade

Os motores de C.A., exceto os universais, são máquinas de velocidade constante. Há, entretanto, possibilidade de ser religadas as bobinas do estator de um motor de indução, de tal maneira a duplicar o número de pólos e, desta forma, reduzir a velocidade à metade conforme já foi visto em capítulos anteriores, onde os estatores podem ser construídos com dois enrolamentos independentes, calculados para o número de pólos que se deseja, conseguindo-se por meio de pólos reversíveis (variação de pólos) e com reduzido número de conexões variar a velocidade síncrona do motor.

Cada um destes bobinamentos pode então ser ligado de forma a possibilitar duas velocidades, na razão de 2:1, obtendo-se assim quatro velocidades síncronas independentes; contudo, não poderão proporcionar quaisquer velocidades intermediárias.

Com motores de indução de rotor bobinado é possível obter-se qualquer velocidade desde zero até aproximadamente a velocidade de sincronismo, mediante a variação de uma simples resistência ligada ao bobinamento do rotor, e que não implica em aquecimento do mesmo, pois as perdas na resistência são externas ao motor.

Um outro método de regulação da velocidade dos motores de C.A., que permite obter no eixo uma velocidade que pode ir desde zero até o dobro da velocidade síncrona, é pelo conhecido sistema do rotor com comutador, através de decalagem das escovas.

Outra possibilidade de alteração de velocidade nos motores de indução é por meio de variações na freqüência e da tensão.

Nos motores de corrente contínua, a velocidade pode ser regulada pela inserção de um reostato no circuito. O sistema Ward Leonard permite efetuar ampla gama de variações de velocidade num motor.

Para grandes variações de velocidade, empregam-se os variadores de controle eletrônicos estáticos que se destacam pela máxima precisão nas tolerâncias de variação. Estes tipos de acionadores são desde pequenas potências (fração de cv) até aproximadamente 12000 cv. A faixa de variação é de 200 : 1 aproximadamente, sendo a regulação de cerca de 5%. O conjugado, conforme as características construtivas, pode ser constante ou aumentar na faixa superior da velocidade prevista.

Limitação da corrente de partida

A ligação dos motores a uma rede elétrica pública deve observar as prescrições para este fim, estabelecido por norma.

Normalmente, procura-se arrancar um motor a plena tensão a fim de se aproveitar ao máximo o binário de partida. Quando o arranque a plena tensão de um motor elétrico provoca uma queda de tensão superior à máxima admissível, deve-se recorrer a um artifício de partida com tensão reduzida, tendo porém o cuidado de verificar se o torque é suficiente para acionar a carga.

Há dois métodos para reduzir a tensão na partida:

a) Fornecer corrente à tensão normal, fazendo-se o motor temporariamente apropriado à tensão maior, empregando-se o sistema de partida em estrela-triângulo;

b) Fornecer corrente em tensão abaixo da normal por meio de resistências, indutâncias ou autotransformador.

Todos os sistemas de partida com tensão reduzida apresentam (em oposição à vantagem da redução da corrente) a desvantagem de que o momento ou conjugado de arranque reduz-se na proporção do quadrado da redução da tensão fornecida ao motor.

Proteção Mecânica

Os motores devem ser protegidos tanto para a proteção do pessoal de serviço como contra influências prejudiciais externas para o próprio motor, devendo satisfazer aos requisitos de segurança, prevenção de acidentes e incêndios.

A carcaça do motor serve para fixá-lo no local de trabalho e protegê-lo conforme o ambiente onde será instalado. É construída de maneira a englobar as diversas modalidades de proteção mecânica para satisfazer às exigências das normas, referentes a instalações e máquinas para as quais serão destinados os motores.

Basicamente, entretanto, as proteções mecânicas classificam-se em três categorias: à prova de pingos e respingos, totalmente fechados e à prova de explosão.

Motor à prova de pingos e respingos. — Todas as partes rotativas, ou sob tensão, são protegidas contra água gotejante de todas as direções, não permitindo a entrada direta ou indireta de gotas ou partículas de líquidos ou objetos sólidos que se derramem ou incidam sobre o motor.

Motor totalmente fechado. — Este tipo de motor é de tal forma encerrado que não há troca do meio refrigerante entre o exterior e o interior do invólucro, não sendo necessariamente estanque. Dependendo das características requeridas, tais motores podem dispor ou não de ventilador para refrigeração.

Motor à prova de explosão. — São motores construídos para serviço em ambientes saturados de gases e poeira, suscetíveis ao perigo de inflamação rápida, não podendo provocar a mesma, quer por meio de faísca ou pelo alto aquecimento.

Seu invólucro resiste a explosões de gases ou misturas explosivas especificadas no seu interior, e impede que uma atmosfera inflamável circundante sofra ignição por isso.

Proteção elétrica

Como todo motor está sujeito a sofrer variações do ponto de vista elétrico, há, portanto, conveniência em protegê-lo. Em geral, as proteções principais necessárias são contra: curto-circuito, sobrecargas, baixa tensão, fase aberta, reversão de fase, defeitos internos etc.

Os dispositivos de proteção fazem operar os mecanismos de desligamento no caso de existir uma predeterminada condição.

Capítulo 18

TERMINOLOGIA

Alarme

Dispositivo que protege homens, equipamentos e produtos prevenindo anormalidades através de um indicador, tal como lâmpada, buzina, zumbidor, campainha, etc.

Botoneira

Dispositivo empregado para comandar, ligar e desligar circuitos de corrente.

Chave

Dispositivo destinado a ligar, desligar ou mudar as ligações de um circuito elétrico entre limites estabelecidos de tensão ou de intensidade de corrente, nunca excedentes às condições normais do circuito. A chave serve como separadora da rede, existindo em diferentes tipos e, sua ligação é tão fácil quanto a de um interruptor simples. Seus contatos se situam no circuito de força.

Chave de partida direta

Quando a chave de arranque aplica toda tensão da rede de alimentação aos bornes do motor, diz-se que esta chave opera diretamente ou faz o arranque direto no motor, chama-se por isto chave de partida direta.

Chave demarradora

É semelhante a chave de partida. Demarragem é o mesmo que arranque ou início de funcionamento de um motor.

Chave magnética ou contactor

Chamada também de "Guarda Motor". É constituída por um sistema eletromagnético que acelera a abertura ou fechamento de um circuito. Permite com pequenas intensidades de correntes, o comando de equipamentos elétricos que solicitam grandes cargas. Uma das principais características do contactor é a de permitir fácil comando a distância e o comando automático de motores.

Chave estrela-triângulo

Destina-se à partida de motores trifásicos com rotor em curto-circuito. Esta chave só se aplica para motores cuja tensão nominal em triângulo coincida com a tensão nominal entre fases da linha de alimentação.

Chave compensadora

É utilizada para partidas sob cargas de motores trifásicos com rotor em curto-circuito de qualquer tipo. Reduz a corrente de arranque, evitando sobrecarregar a linha de alimentação. Deixa, porém, o motor com um binário suficiente para a partida.

Chave comutadora

Destina-se para diversas funções tais como comando de circuitos de corrente, manobras, seleção entre circuitos de medição de corrente, comutação de voltímetros, etc.

Chave reversora

Emprega-se onde há necessidade de inversão do sentido de rotação dos motores; alimentar um mesmo circuito por duas redes diferentes, uma principal e a outra auxiliar, etc.

Chave fim de curso

Também chamada de chave limite, destina-se ao comando de circuitos auxiliares e de manobra em instalações elétricas de qualquer tipo, como por exemplo a parada ou partida de um motor num ponto pré-fixado de um ciclo de operação, desligamento a distância etc.

Chave de faca

Chamada também de "seccionadora" destina-se apenas ao comando de circuitos sem carga, para separar e tornar visivelmente sem tensão certos trechos do circuito.

Chave de emergência

É composta de dois contactores, tem a finalidade de automaticamente ligar uma fonte auxiliar no caso de falha do fornecimento de energia.

Controlador

Dispositivo ou grupo de dispositivos destinados a regular de forma predeterminada o fornecimento de energia ao equipamento controlado, a fim de obter deste o desempenho desejado.

Controle de seqüência

Dispositivo usado para nos assegurarmos de que uma determinada operação só se efetuará depois de uma outra que necessàriamente deve antecedê-la.

Denominação dos terminais de um motor trifásico

Os três enrolamentos do estator de um motor trifásico são denominados da seguinte forma:

Fase 1, U — X. Fase 2, V — Y. Fase 3, W — Z. Alguns motores estão marcados com números cuja correspondência com as letras na maioria dos casos são: 1 — U; 2 — V; 3 — W; 4— X; 5 — Y; 6 — Z.

As pontas iniciais do enrolamentos 1, 2, 3 ou U, V, W e os terminais 4, 5, 6 ou X, Y, Z são conduzidos para fora do motor e dispostos no quadro de bornes, figs. 62 e 63. A conexão à linha de alimentação será feita de modo que os bornes da rede R, S, T (cuja correspondência com os números são: R — L_1; S — L_2; T — L_3) sejam ligados a 1, 2, 3 ou U, V, W, respectivamente.

Disjuntor

Dispositivo capaz de ligar e desligar um circuito elétrico em condições de sobretensão, de sobre intensidade de corrente ou em condições normais.

A principal característica do disjuntor é seu mecanismo de fechamento. O mecanismo de fechamento é travado mecanicamente na posição de ligação (travamento) e possui sempre um desengate livre que permite efetuar o desligamento em condições predeterminadas (logo que houver uma sobrecorrente, curto-circuito, queda da tensão, etc.) tanto automaticamente como manualmente.

Fator de potência

É o co-seno do ângulo entre os vetores da tensão de fase e da corrente de fase, independente de ser a conexão Δ ou Y.

Freagem dinâmica

Tem como função a de se usar a energia mecânica armazenada no movimento do rotor do motor, após a linha de alimentação ter sido aberta. Um método é o seguinte; no instante em que o motor é desligado da rede uma resistência de descarga é conectada a ele como dissipador de energia em forma de calor. Um outro método usado é o de trocar a função do motor para aquela de um gerador, convertendo energia mecânica em elétrica.

Fusíveis

São utilizados para dar proteção contra curto-circuitos. Existe uma grande variedade de tipos com características e finalidades próprias, e cada finalidade exige um tipo de fusível apropriado.

Normalmente combinam duas ações: detenção de falhas e interrupção do circuito, isolando a rede das correntes de curto-circuito.

Fusível rápido

Sua função é interromper o circuito instantaneamente para correntes de curto-circuito. Tem o menor tempo de ação e sua capacidade de ruptura deve estar sempre dentro dos limites de segurança do equipamento protegido.

Fusível retardado

É construído para aumentar o tempo de ação. É especialmente indicado para controlar correntes de sobrecarga ou sobrecorrente. Está constituído por uma série de elementos que agem como compartimentos armazenadores de calor. Se a sobrecarga é de curta duração, esses elementos absorvem o calor e impedem a interrupção do circuito. Quando a sobrecarga se prolonga além de determinados limites preestabelecidos, interrompem o circuito. No caso de um curto-circuito os elementos fundem instantaneamente.

Fusível de duplo efeito

Devido à construção especial de materiais fusíveis com diferentes pontos de fusão, reune as características de fusível retardado para correntes de sobrecarga, e de fusível rápido para correntes de curto-circuito. Podem, assim, ser empregados vantajosamente em circuitos com sobrecargas transitórias, como é o caso de partida direta de motores trifásicos com rotor em curto-circuito.

Interruptor

Dispositivo para produzir interrupções instantâneas da corrente num circuito.

Intertravamento

Proteção contra uma operação errada do operador ou uma falha mecânica ou elétrica do equipamento.

Regulador.

Sistema automático capaz de manter constante uma grandeza (tensão, corrente, potência, velocidade etc.) de acordo com um padrão fixo.

Relé.

Dispositivo operado pela variação das características de um circuito eletrico, para efetuar a operação de outros dispositivos, no mesmo, ou em outro circuito elétrico. Seus contatos se situam no circuito de controle.

Relé de tempo.

Tem como função principal iniciar seqüências de comando com retardamento, em circuitos de manobras, proteção e regulação de qualquer tipo etc.

Relé bimetálico.

Também chamado de relé-térmico. Consiste, em geral, de uma lamina bimetálica aquecida pela passagem da corrente elétrica. O bimetal, propriamente dito, possui dois metais de coeficientes de dilatação diferentes entre si, porém intimamente ligados, como por exemplo, invar (liga de aço e níquel) e latão. A lâmina se encurva ou se distende sobre o lado em que está o metal que tem menor coeficiente de dilatação podendo atuar de duas maneiras; mecanicamente, destravando um mecanismo de disparo e, eletricamente, separando dois contatos que estão em série com um dispositivo que interrompe o circuito.

A inércia própria da dilatação e do correspondente encurvamento do bimetal não permite o seu uso na proteção contra grandezas que devam ser imediatamente desligadas, como por exemplo no caso das correntes de curto-circuito.

Os relés bimetálicos são de dois tipos: de reajuste ou rearme automático e de rearme manual.

Relé térmico automático.

Faz com que após um desligamento por deformação da lâmina bimetálica, se restabeleça o contato elétrico automaticamente após o esfriamento da lâmina.

Relé térmico com retenção.

Chamado também de reajuste ou rearme manual. A lâmina bimetálica permanece afastada do contato elétrico após o desligamento e resfriamento, sendo o relé rearmado por pressão manual sobre um botão especialmente disposto para este fim.

O relé com retenção é utilizado para impedir a religação de um circuito desligado por sobrecarga, após o resfriamento do relé, permitindo desta forma verificar a causa do defeito que levou á atuação do relé.

Reversão.

O mesmo que inversão ou troca de sentido. A chave reversora é a que faz o motor elétrico girar num ou noutro sentido.

Servomecanismo.

Dispositivo de comando e regulação que utiliza a realimentação. O acionamento é corrigido em função de condições variáveis surgidas, como por exemplo, uma manobra exterior ou erros devidos ao próprio servomecanismo.

Sistema.

Conjunto independente de instalações ou componentes elétricos ligados por alguma forma de interação, que se completam para a consecução de uma determinada finalidade.

Sobrecarga.

Corrente solicitada pela carga, ocasionando uma elevação de temperatura num componente de circuito tal que, caso fosse permitido que essa corrente passasse indefinidamente no circuito, a temperatura final do componente considerado ultrapassaria o seu limite permissível.

Sobrecorrente.

Condição que existe num circuito quando a corrente que passa pelo mesmo excede o valor especificado da corrente nominal, permanente ou de curta duração, de qualquer componente do circuito.

Temporizador.

Dispositivo usado quando se deseja que haja um lapso de tempo entre uma operação e a que lhe segue.

Capítulo 19

REPRESENTAÇÃO DOS DIAGRAMAS ELÉTRICOS

Introdução.

Para melhor compreender o princípio de funcionamento de um sistema elétrico, é norma representá-lo de forma esquemática.

Para facilitar a identificação dos componentes e de suas funções, os diagramas elétricos devem ser: claros e não se prestar a equívocos, fáceis de traçar, com o mínimo de linhas, simples e fáceis de lembrar, simbologia de uso o mais geral possível, concisos para que possam ser compreendidos por qualquer técnico do ramo mesmo sem conhecer o equipamento a que se refere, etc.

Os diagramas são apresentados sempre em repouso, considerando-se desligadas todas as fontes, não havendo circulação de corrente; todas as grandezas não elétricas como pressão, temperatura etc., são supostas em seus valores mínimos.

O desenvolvimento dos esquemas deve-se fazer em linha reta, evitando cruzamentos desnecessários. Os circuitos de força são separados dos de controle. As alimentações comuns aos vários circuitos são representadas por linhas paralelas horizontais ou verticais. Para alimentação monofásica e para alimentação em corrente contínua, as linhas de alimentação são afastadas para as bordas do desenho, sendo os circuitos representados no espaço intermediário. Para alimentação trifásica as linhas são próximas. Os contatos deslocam-se sempre no sentido de passar da posição de repouso para a de trabalho. Todos os contatos com a mesma identificação mudam de posição simultaneamente, exceto os temporizados. A representação sucessiva dos circuitos deve ser feita, na medida do possível, seguindo a sucessão lógica da seqüência das manobras.

Normalmente, todo dispositivo de comando além dos contatos principais destinados ao circuito de força possui um ou mais contatos adicionais, de menor capacidade de corrente, chamados de "contatos auxiliares", destinados a circuitos de controle e sinalização.

Diz-se contato auxiliar tipo "a" ou "normalmente aberto" quando o dispositivo de operação principal está na posição de repouso ou não operado; se nas mesmas condições, o contato está fechado, diz-se contato auxiliar tipo "b" ou "normalmente fechado" quando o dispositivo de operação está na posição de desenergizado.

MÉTODO PARA A REPRESENTAÇÃO DE ESQUEMAS

Há quatro métodos básicos de representação de cada esquema ou diagrama desenhado: a) esquema de princípio; b) esquema de

circulação de corrente; c) esquema unifilar; d) esquema de funcionamento.

a) Esquema de princípio.

O esquema de princípio é chamado também funcional, elementar etc., (fig. 97). É o que ilustra a seqüência de operações e facilita a compreensão do projeto porque mostra os circuitos individuais através dos elementos dissolvidos e separados dos equipamentos, prevalecendo nele o aspecto funcional, não precisando ser respeitada a localização real dos dispositivos.

b) Esquema de circulação de corrente.

O esquema de circulação de corrente é cada vez mais preferido pelas indústrias e oficinas, porque se subdivide o diagrama de funcionamento em dois esquemas chamados de: circuito principal ou de força e circuito de comando ou controle. As figs. 104 e 106 mostram o circuito de comando do circuito das figs. 105 e 107 respectivamente. O circuito de força se há representado conjugado com o de controle, para melhor interpretação da seqüência do esquema.

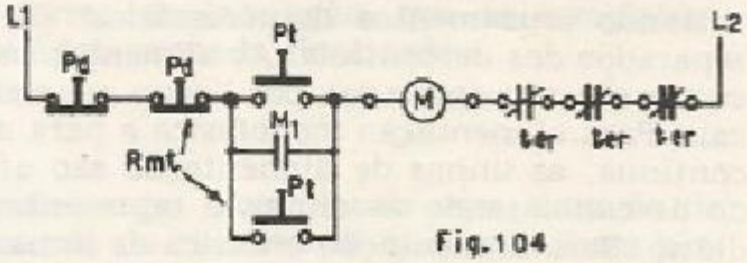


Fig. 104 — Esquema do circuito auxiliar ou de comando da fig. 105.

Fig.104

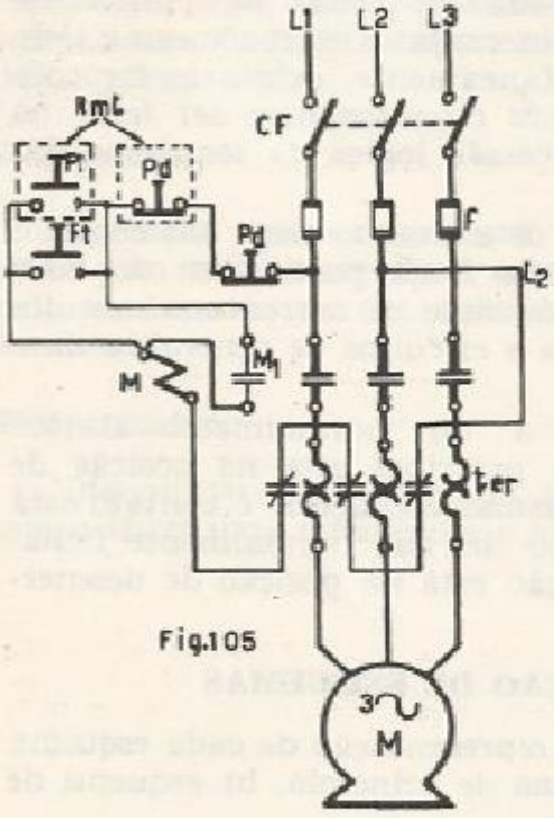


Fig.105

Fig. 105 — Diagrama de funcionamento de um motor trifásico. L_1, L_2 e L_3 — linhas de alimentação. Rmt — controle remoto. CF — chave de facas. Ter — Térmicos.

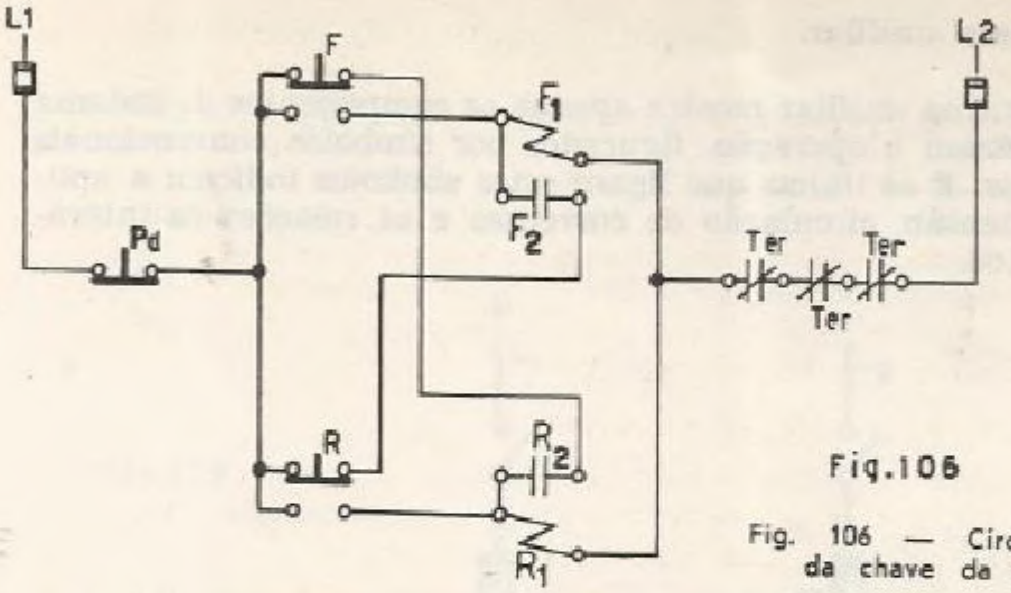


Fig.106

Fig. 106 — Circuito auxiliar da chave da fig. 107.

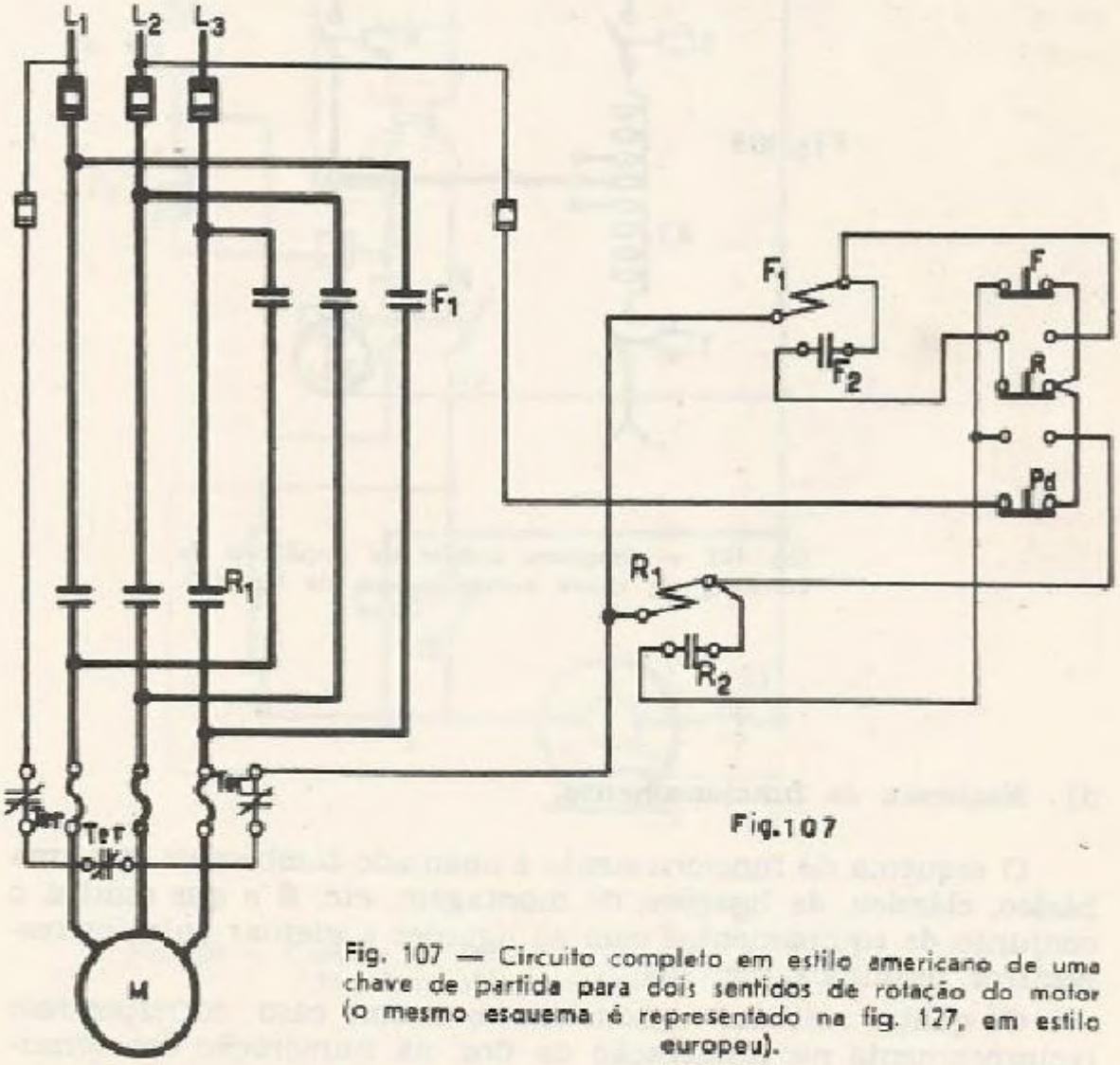


Fig.107

Fig. 107 — Circuito completo em estilo americano de uma chave de partida para dois sentidos de rotação do motor (o mesmo esquema é representado na fig. 127, em estilo europeu).

c) **Esquema unifilar.**

O esquema unifilar mostra apenas os componentes do sistema que interessam à operação, figurados por símbolos convencionais apropriados. E as linhas que ligam estes símbolos indicam a aplicação de tensão, circulação de correntes e as relações de interação, fig. 108.

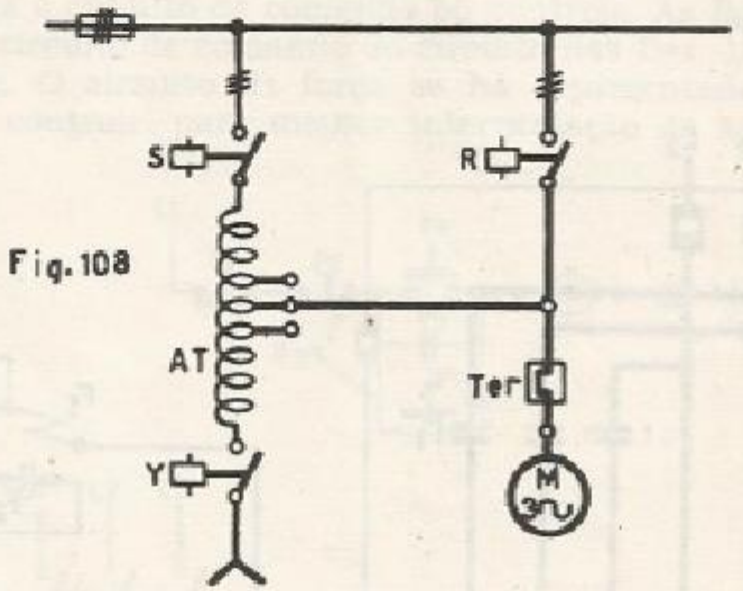


Fig. 108

Fig. 108 — Diagrama unifilar de circulação da corrente, da chave compensadora da fig. 125.

d) **Esquema de funcionamento.**

O esquema de funcionamento é chamado também de esquema básico, clássico, de ligações, de montagem, etc. É o que mostra o conjunto de equipamentos com as ligações a efetuar entre os respectivos terminais, fig. 109.

Os quatro métodos demonstram o mesmo caso; correspondem reciprocamente na numeração de fios, na numeração dos terminais, na nomenclatura dos equipamentos, etc.

Fig.109

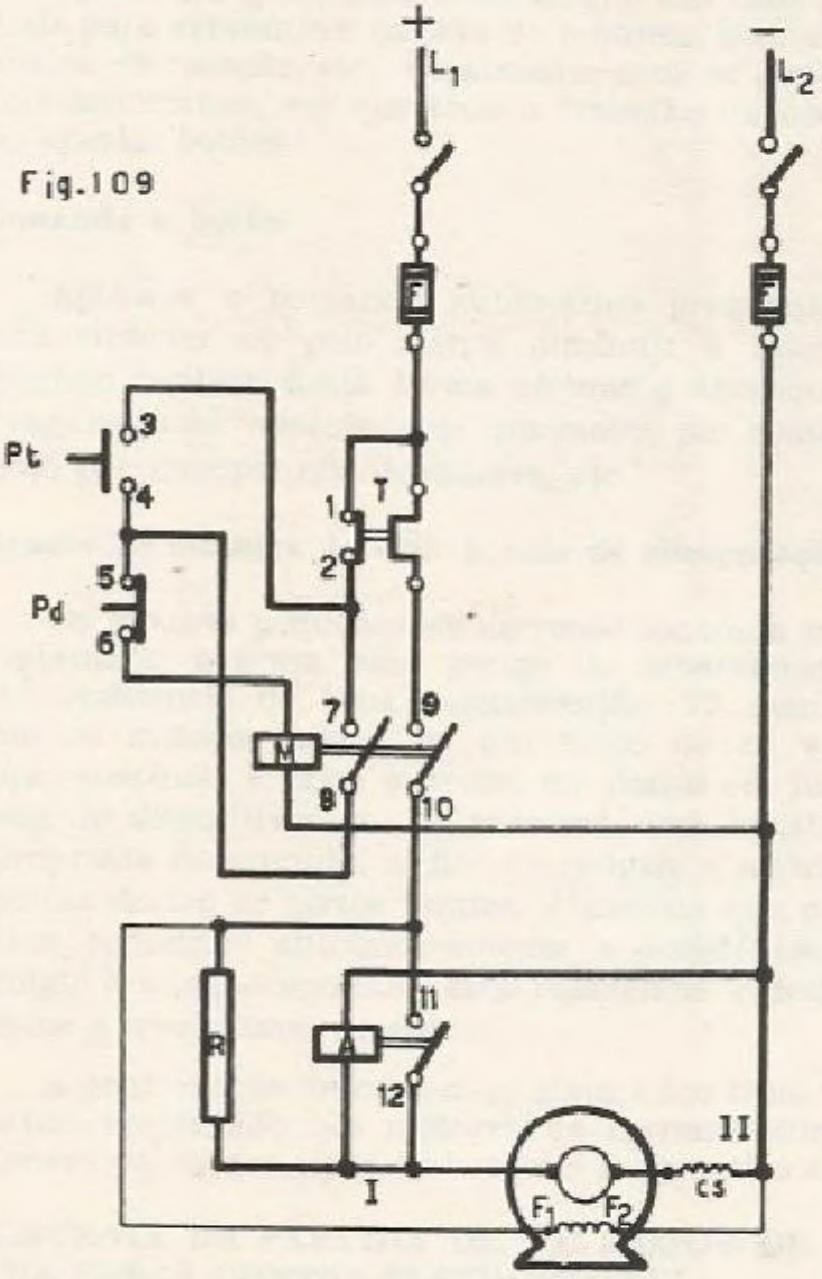


Fig. 109 — Controle de partida de um motor de C.C.
Esquema estilo europeu.

Capítulo 20

CONTROLE AUTOMÁTICO PARA MOTORES

Introdução.

Apesar de que ainda existem em uso muitos comandos manuais para arranque e parada de motores, bem como mudança do sentido de rotação, etc., atualmente está se generalizando o controle automático, em que todo o trabalho do operador se resume em apertar botões.

Comando a botão.

Aplica-se o comando automático pressionando-se um botão para eliminar ou pelo menos diminuir a intervenção humana, podendo também desta forma efetuar o arranque e a parada ou a regulação de velocidade de um motor por comando a distância, como por exemplo nos elevadores, etc.

Ligação de motores de C.C. à rede de alimentação.

Os motores pequenos de corrente contínua podem ser ligados diretamente à linha, sem perigo de superaquecimento devido à alta resistência de seus enrolamentos. O mesmo não acontece com os motores acima de um terço de cv aproximadamente, cuja resistência é baixa e devem ser postos em funcionamento por meio de dispositivos que introduzem uma resistência reguladora apropriada no circuito, a fim de reduzir e manter a corrente de partida dentro de certos limites. À medida que o motor acelera-se vai-se reduzindo automaticamente a resistência introduzida. Ao atingir a rotação nominal, esta resistência é desligada e o motor recebe a tensão total da rede.

A continuação descrevem-se alguns dos tipos de controle automático empregado nos motores de corrente contínua, já que o número dos vários tipos de contrôle automático é grande.

CONTROLE DE PARTIDA DE UM MOTOR DE C.C. POR MEIO DA FORÇA CONTRA-ELETROMOTRIZ.

No momento de se dar partida a um motor, a força contra-eletromotriz (f.c.e.m.) através do induzido é baixa. À medida que o motor acelera, esta f.c.e.m. aumenta. A voltagem através do induzido do motor é utilizada para operar um relé, a fim de reduzir a resistência de partida, quando a velocidade apropriada do motor tiver sido atingida.

Partida do motor.

Quando o botão de partida (Pt) é calcado, o contator principal "M" é energizado (figs. 109 e 110) já que passa corrente na sua bobina de operação. Isto fecha o contato principal 9-10 do contator "M". Fecha-se também o contato auxiliar 7-8 em torno do botão de partida, de tal forma que, embora se liberte este último, continua passando corrente na bobina do contator "M".

O circuito de controle para a bobina do contator "M" é completado de L_1 através do contato 1-2 do relé térmico "T", contato 7-8 de retenção e o contato 5-6 do botão de parada (normalmente fechado). L_2 chega direto à bobina de "M".

Quando o contato principal 9-10 do contato "M" fecha, o circuito do induzido do motor é completado de L_1 através do relé térmico "T" e a resistência "R" em série com o induzido. O enrolamento do circuito de campo paralelo F_1-F_2 está conectado em paralelo com o circuito do induzido e o bobinamento série do campo "CS". O contato 11-12 do relé de força contra-eletromotriz "A", permanece aberto na partida.

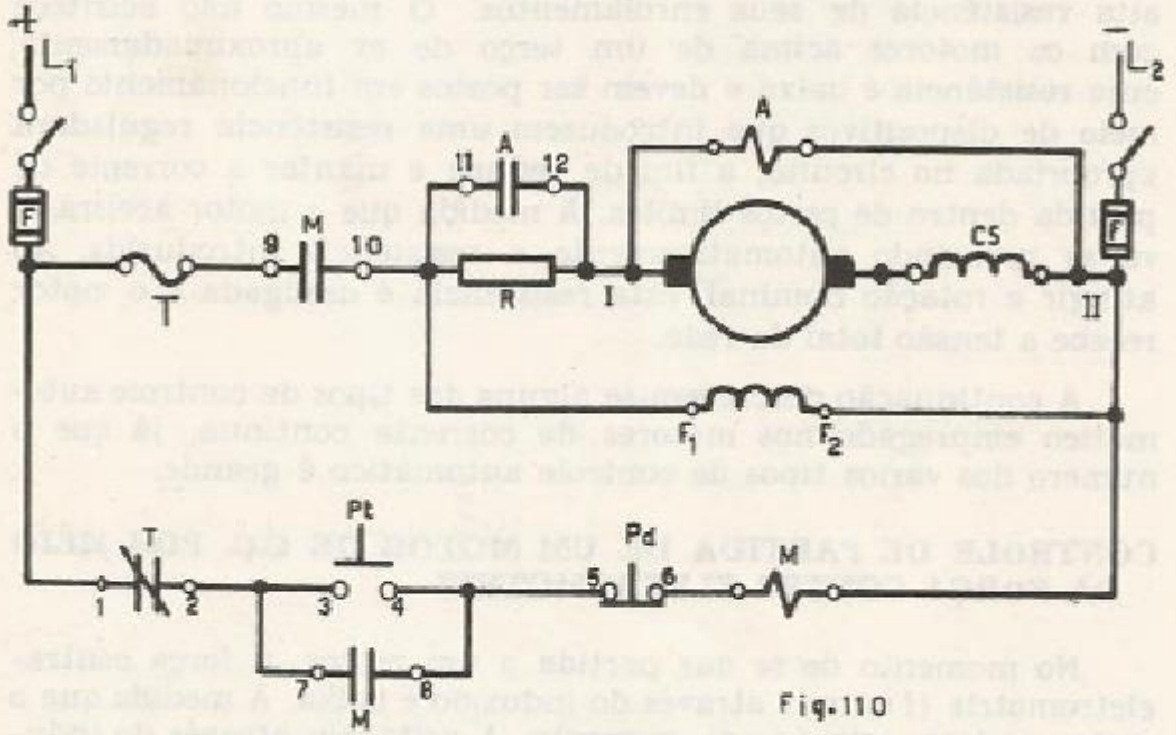


Fig. 110 — O mesmo esquema da fig. 109, representado em estilo americano.

A f.c.e.m. produzida no induzido é diretamente proporcional à velocidade. À medida que o motor acelera, a f.c.e.m. aumenta e a corrente do induzido e a queda de tensão através da resistência "R" de partida diminui. O relé "A" conectado em paralelo com o induzido e o enrolamento série do campo está calibrado para operar em aproximadamente 80% da tensão nominal. Conforme o motor acelera, aumenta a tensão entre os terminais I-II do induzido e, ao atingir a tensão para a qual é calibrado o relé "A", este opera fechando o contato 11-12, curto-circuita a resistência de partida "R", e o induzido fica conectado diretamente na linha.

Parada do motor.

Para parar o motor basta calcar o botão de parada "Pd" abrindo o contato 5-6 do circuito de controle. O contator "M" é desenergizado, o contato principal 9-10 e o auxiliar 7-8 abrem e desligam o motor da linha.

A vantagem deste tipo de chave de partida automática é que a mesma não suprirá tensão total através do induzido, até que a velocidade do motor esteja correta. Isto elimina os erros envolvidos no uso de uma chave de partida manual.

CONTROLE DE ACELERAÇAO DE UM MOTOR DE C.C. PÓR QUEDA DE TENSÃO

Os grandes motores de C.C. exigem estágios controlados de aceleração. Uma série de resistências conectadas a relés de travamento servem para suprir os meios para uma aceleração uniforme do motor. Desde que a corrente de arranque de um motor seja alta, as tensões através das resistências de partida, em série, são altas e a tensão através do induzido do motor é baixa. À medida que o motor acelera e a f.c.e.m. aumenta, a corrente do induzido e a queda de tensão através das resistências de partida diminuem. Os relés conectados através destas resistências são calibrados para operar e curto-circuitar as resistências em série de partida, conforme o motor acelera.

Descrição do circuito.

Os circuitos representados nas figs. 111 e 112 mostram um motor composto, onde a partida é dividida em três estágios. Como existem três resistências de arranque, são usados três relés de travamento para suprirem três estágios de aceleração.

Quando o botão de partida "Pt" é pressionado o contator "M" é energizado, a corrente de arranque através das resistências de partida R_1, R_2 e R_3 produz uma grande queda de tensão através de cada seção da resistência, evitando que os relés A_1, A_2 e A_3 fechem seus contatos de aceleração, os quais derivam as resistências de partida.

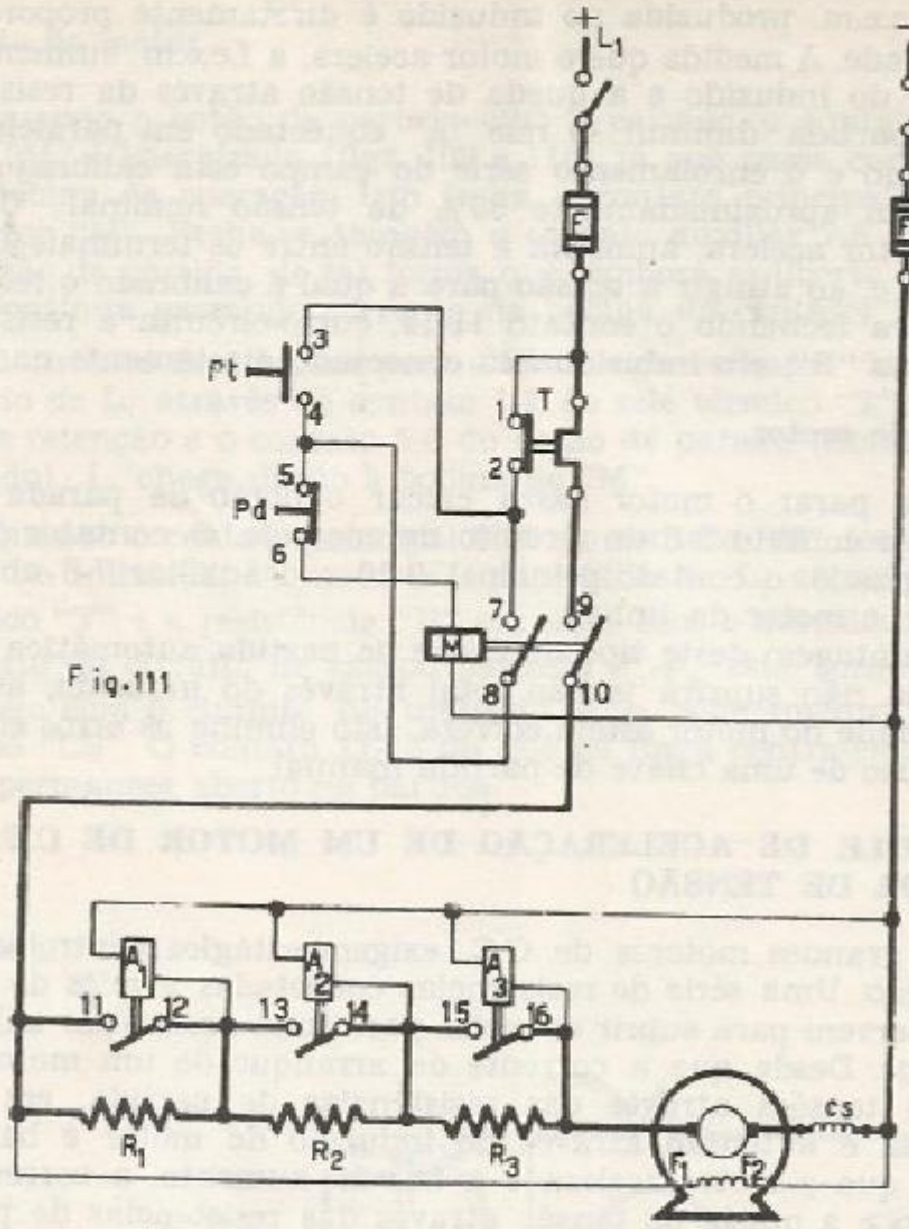


Fig. 111

Fig. 111 — Diagrama em estilo europeu do controle de aceleração de um motor de C.C. por queda de tensão.

À medida que o motor acelera, a f.c.e.m. aumenta, a corrente do induzido diminui, e aumenta a tensão entre os terminais do relé A_1 o qual opera e fecha o contato 11-12 curto-circuitando a resistência R_1. Conforme R_1 é desligada a corrente aumenta novamente e a queda de tensão através de R_2 e R_3 é suficientemente alta para manter os contatos dos relés A_2 e A_3 abertos. À medida que o motor continua a acelerar e a corrente de partida se torna menor, aumenta a tensão entre os bornes do relé A_2, permitindo que feche o contato 13-14 e curto-circuite a resistência R_2.

R_3 é desligado da mesma forma que R_1 e R_2. O motor é acelerado até a velocidade normal em três etapas e, fica, finalmente, ligado diretamente na rede de alimentação quando R_3 é desligado.

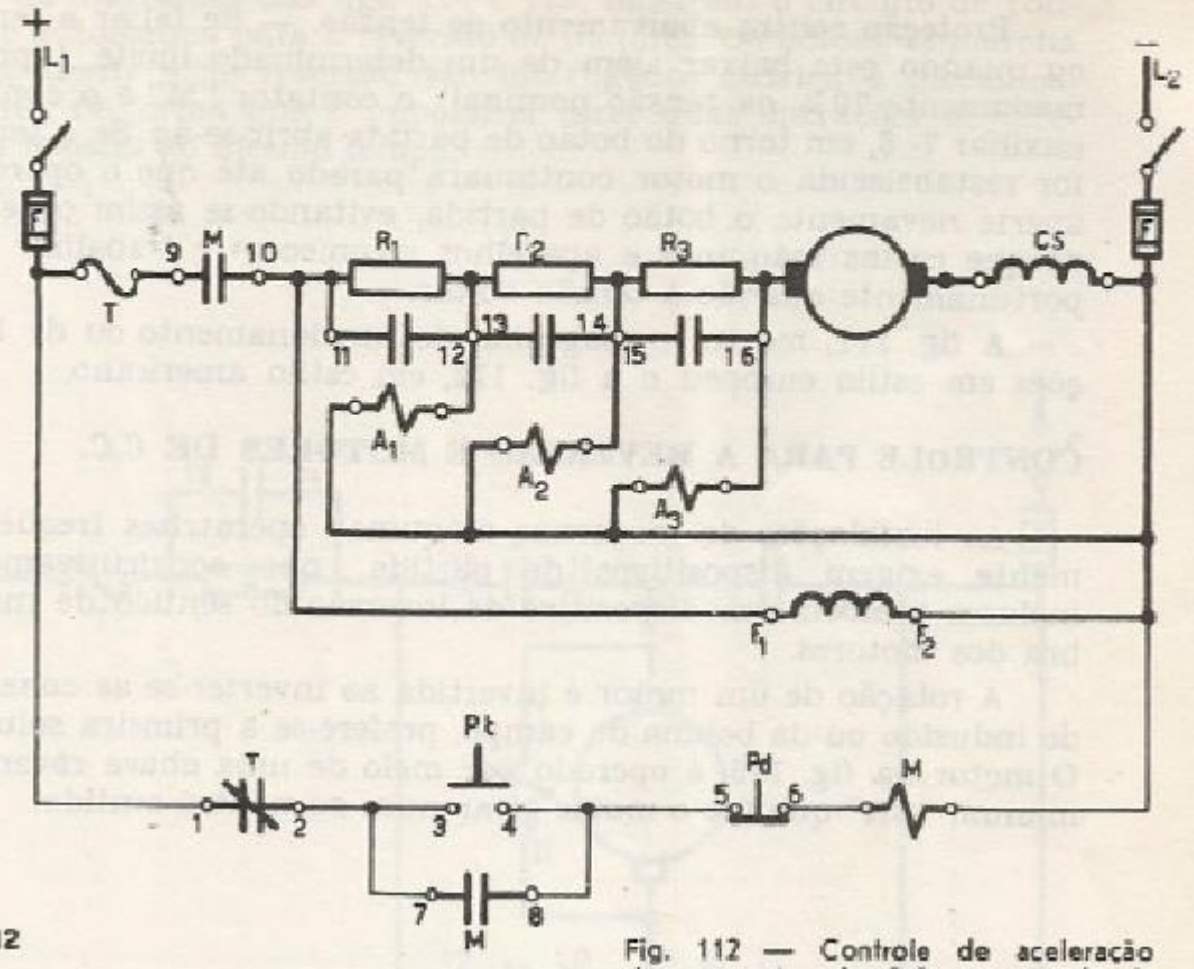


Fig.112

Fig. 112 — Controle de aceleração de um motor de C.C. por queda de tensão. Esquema em estilo americano.

Proteção do motor.

Proteção contra curto-circuito. — Os fusíveis "F" na linha principal do circuito do motor protegem-no contra curto-circuitos. Os fusíveis atuam em função dos efeitos térmicos da corrente elétrica, cujo valor é tanto maior quanto mais elevada é a corrente, variando com o quadrado desta. Este fato é o que leva o fusível à fusão. (figs. 111 e 112).

Proteção de sobrecarga. — O relé térmico "T" que protege o motor contra as correntes de sobrecarga está conectado em série com a linha de alimentação. Se a corrente nominal do motor exceder a um valor predeterminado, o calor produzido neste elemento térmico fará com que a lâmina bimetálica abra e desligue o contato 1-2 que está conectado em série com o circuito de controle (figs. 111 e 112). O contator "M" é desenergizado e abre os contatos principais 9-10 e auxiliar 7-8 desligando o motor da linha.

A corrente de partida, durante o período de arranque, não dura o bastante para aquecer o elemento térmico suficientemente para desligar.

Proteção contra abaixamento de tensão. — Se faltar a tensão ou quando esta baixar além de um determinado limite (aproximadamente 70% da tensão nominal) o contator "M" e o contato auxiliar 7- 8, em torno do botão de partida abrir-se-ão. Se a tensão for restabelecida o motor continuará parado até que o operador aperte novamente o botão de partida, evitando-se assim o perigo de que certas máquinas e aparelhos recomecem a trabalhar inoportunamente quando a tensão voltar.

A fig. 111, mostra o diagrama de funcionamento ou de ligações em estilo europeu e a fig. 112, em estilo americano.

CONTROLE PARA A REVERSÃO E MOTORES DE C.C.

As instalações de modernas máquinas operatrizes freqüentemente exigem dispositivos de partida, que construtivamente incluem também um dispositivo de inversão do sentido de manobra dos motores.

A rotação de um motor é invertida ao inverter-se as conexões do induzido ou da bobina de campo, prefere-se a primeira solução. O motor da fig. 113, é operado por meio de uma chave reversora manual "CR" que faz o motor girar num ou noutro sentido.

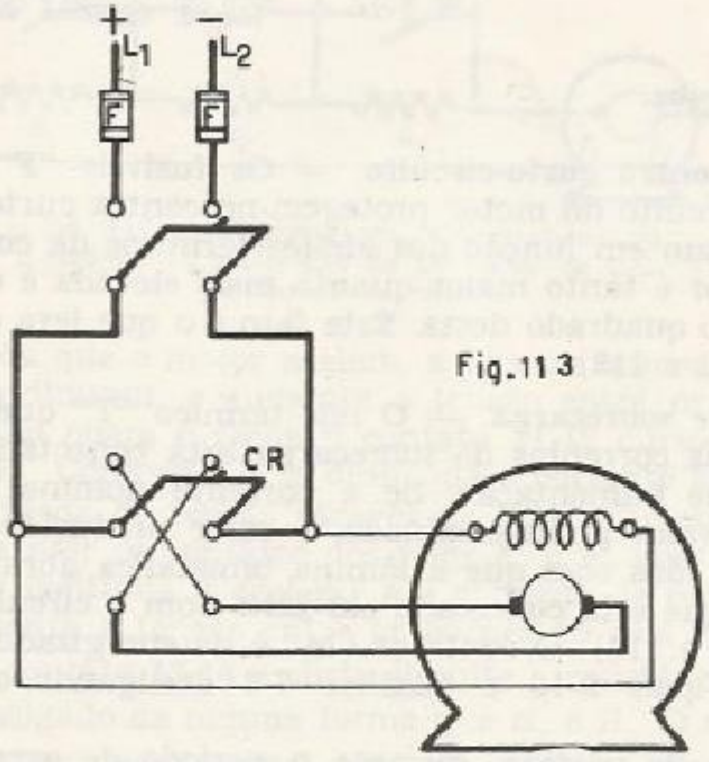


Fig. 113

Fig. 113 — Chave reversora manual para a inversão do sentido de rotação de um motor de C.C.

Os diagramas das figs. 114 e 115, mostram o circuito de controle automático para a reversão de motores. Os botões de marcha para frente e de reversão são interligados elétrica e mecanicamente, de forma que é impossível fazer duas operações de direções opostas ao mesmo tempo.

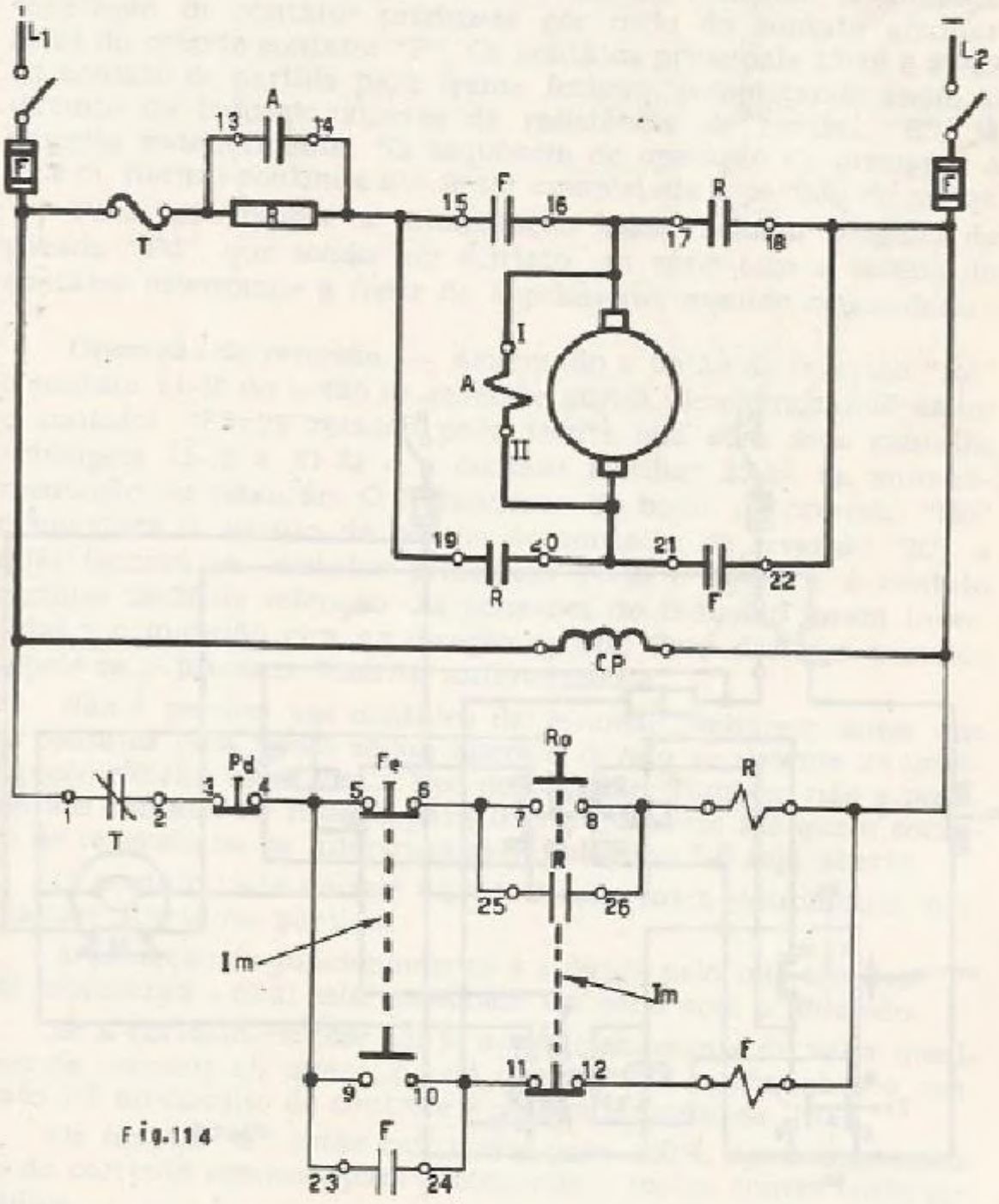


Fig. 114 — Diagrama estilo americano mostrando o circuito de controle automático para reversão do sentido de rotação de um motor de C.C.

Os contatores "F" e "R" têm três pares de contatos, dois principais e um auxiliar. Na posição indicada, com o contato auxiliar que comanda a bobina, aberto, o circuito está em repouso, necessitando para o seu funcionamento comandar o sistema de botoneiras, que sempre dá o comando inicial.

A botoneira possui três posições, sendo duas de marcha (para frente "F" e reversão "Ro") e uma posição de desligamento ou parada "Pd".

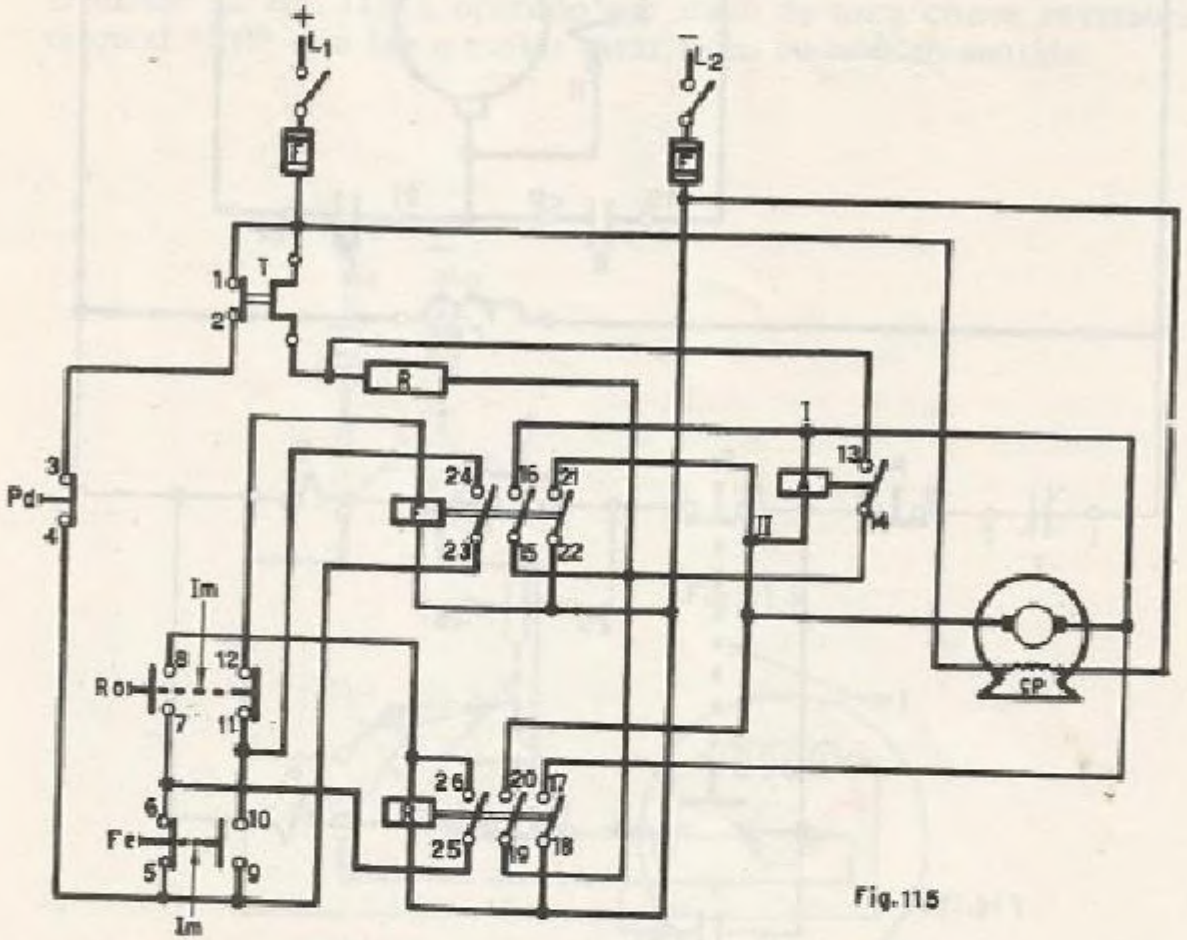


Fig.115

Fig. 115 — O mesmo esquema ou circuito de controle da fig. 114, apresentado em estilo europeu.

Descrição da operação.

Partida para frente. — Quando o botão de comando para frente "Fe" é acionado fechando o contato 9-10, chega energia de L_1 a bobina do contator "F" através do contato de sobrecarga 1-2, contato 3-4 do botão de parada e contato 11-12 do botão de reversão, contato este classificado como de intertravamento entre os contatores para evitar que os dois estejam ligados simultaneamente. L_2 chega diretamente a bobina do contator. A auto-alimentação do contator produz-se por meio do contato auxiliar 23-24 do próprio contator "F". Os contatos principais 15-16 e 21-22 do contato de partida para frente fecham, completando assim, o circuito do induzido através da resistência de partida "R", já descrita anteriormente. Na seqüência de operação de arranque a f.c.e.m. normal continua até se ter completada a partida do motor.

Para interromper a alimentação basta acionar o botão de parada "Pd", que sendo um contato em série com a bobina do contator interrompe a fonte de suprimento, quando comandado.

Operação de reversão. — Acionando o botão de reversão "Ro" o contato 11-12 do botão de reversão abrirá, desenergizando assim o contator "F" de rotação para frente que abre seus contatos principais 15-16 e 21-22 e o contato auxiliar 23-24 de auto-alimentação ou retenção. O fechamento do botão de reversão "Ro" completará o circuito da bobina do contator de reversão "R", a qual fechará os contatos principais 17-18 e 19-20 e o contato auxiliar 25-26 de retenção. As conexões do induzido foram invertidas e o induzido gira na direção oposta. Para desligar o motor repete-se o processo descrito anteriormente.

Não é possível aos contatos de reversão fecharem antes que os contatos para frente sejam abertos, devido ao sistema de interligação elétrica usado neste tipo de controle. Também não é possível aos contatos de rotação para frente fecharem até que o contato de reversão ou de intertravamento elétrico 5-6 seja aberto.

O contato 13-14 do relé "A" de força contra-eletromotriz, permanece aberto na partida.

A proteção de funcionamento é suprida pelo relé térmico "T" de sobrecarga o qual está conectado em série com o induzido.

Se a corrente exceder 125% aproximadamente do valor nominal da corrente do motor, o relé térmico "T" opera, abre o contato 1-2 no circuito de contrôle e desliga o motor da linha.

Os fusíveis "F" estão calculados para 150% aproximadamente da corrente nominal, para protegerem o motor contra curto-circuitos.

"Im" é a interligação mecânica da botoneira e "R" a resistência de partida.

Capítulo 21

SISTEMA DE ARRANQUE DE MOTORES TRIFÁSICOS

Introdução.

Nos motores trifásicos de rotor em curto-circuito abaixo de 3 a 5 cv aproximadamente, é raro o emprego da chave estrela-triângulo, fazendo-se a ligação direta a rede. Entende-se por partida direta a ligação do motor à linha, de maneira a receber, de imediato, toda a tensão, partindo com todo o conjugado (comumente força) de que é capaz. As figs. 105, 116 e 117, mostram o sistema de arranque de um motor trifásico.

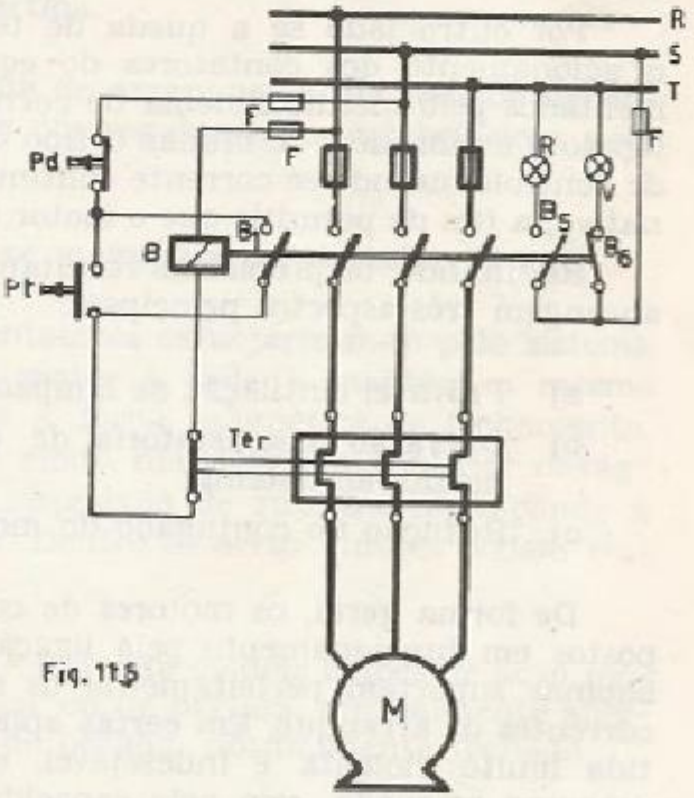


Fig. 116 — Diagrama do controle de partida de um motor trifásico. Tem duas lâmpadas indicadoras. V — lâmpada verde, incicação de motor parado. R — lâmpada vermelha, indica que o motor está energizado.

Fig. 115

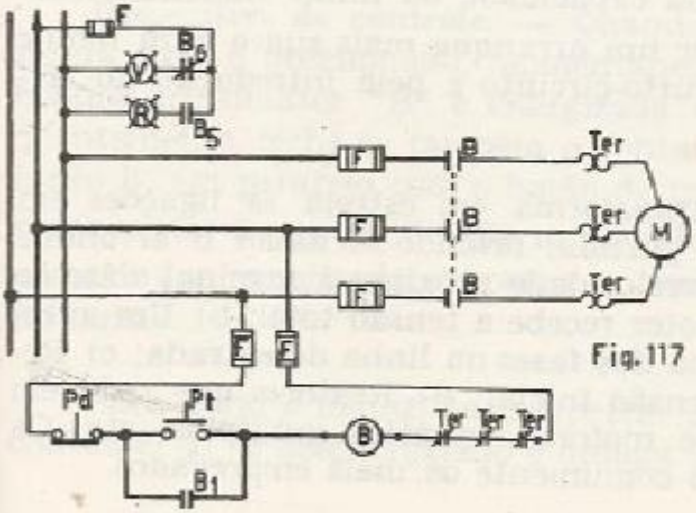


Fig. 117

Fig. 117 — O mesmo esquema da figura 116, representado em estilo americano.

Efeitos causados num sistema elétrico pela partida de um motor com rotor em curto-circuito diretamente ligado à fonte alimentadora.

No momento da partida, flui através do sistema elétrico uma corrente 7 a 8 vezes e meia maior que a corrente a plena carga do motor. Como conseqüência, verifica-se uma queda de tensão momentânea indesejável no sistema, que por vezes é superior à máxima admissível e origina bruxuleios da luz, alterações no comportamento das outras cargas e sobre o conjugado de partida do motor em consideração.

Se a tensão cair na partida a um valor que provoque reflexos indesejáveis nas outras cargas, ou no equipamento de controle, deve-se recorrer a um método de arranque com tensão reduzida.

For outro lado se a queda de tensão não consegue efetuar o acionamento dos contatores do equipamento de controle alimentados pelo mesmo sistema de corrente alternada ao qual está ligado o motor, deve-se mudar o tipo de alimentação dos circuitos de controle, usando-se corrente contínua em vez de corrente alternativa, a fim de permitir que o motor parta a plena tensão.

Resumindo, os problemas resultantes da partida de um motor abrangem três aspectos principais:

a) Provável cintilação de lâmpadas;

b) Operação insatisfatória de outros dispositivos elétricos ligados ao sistema;

c) Redução no conjugado do motor durante a partida.

De forma geral, os motores de corrente alternada podem ser postos em funcionamento pela ligação direta na rede, pois suas bobinas suportam perfeitamente os efeitos magnéticos das altas correntes de arranque. Em certas aplicações, entretanto, uma partida muito violenta é indesejável, seja pelas características da máquina acionada, seja pela capacidade da linha alimentadora.

As maneiras de se obter um arranque mais suave num motor assíncrono com rotor em curto-circuito é pela introdução no circuito de:

a) Um controle que transforma em estrela as ligações em triângulo no momento da partida, fazendo-se assim o arranque suavemente; atingida uma velocidade próxima à nominal volta-se a ligar em triângulo e o motor recebe a tensão total; b) Um autotransformador em cada uma das fases ou linha de entrada; c) Resistências que baixam a tensão inicial; d) Reatores que reduzem a tensão; e) Aplicação de motores de pólos múltiplos, etc. Os dois primeiros métodos são comumente os mais empregados.

Partida de um motor de rotor bobinado.

Nos motores de rotor bobinado ou de anéis, fig. 55, a partida é semelhante à dos motores de corrente contínua. Efetua-se a partida inserindo-se no circuito do rotor uma resistência tripla, que, através de "pontos", é progressivamente eliminada à medida que o motor adquire velocidade. Depois de atingida a rotação nominal, a resistência é suprimida até o rotor entrar em curto-circuito e o motor funciona como se fosse de gaiola.

Este dispositivo de partida pode ser empregado como regulador de velocidade se as resistências têm capacidade suficiente para suportar toda a corrente de carga.

Limitações da corrente de partida.

As limitações da corrente de arranque ou de partida dependem da aplicação do motor e dos regulamentos estabelecidos pela empresa de energia elétrica.

Partida de motores com chave magnética ou contator.

Simplificadamente os contatores caracterizam-se pelo sistema eletromagnético que liga o motor à rede e mantém o mesmo ligado, enquanto permanece a força magnética de fechamento, fig. 116. Desaparecendo o efeito magnético o contator desliga sob a ação de molas. Sua capacidade de ruptura corresponde à corrente de partida do motor. Dentro de certos limites podem realizar função protetora.

A botoeira de comando é formada de dois botões de ação momentânea, sendo um para ligar ou de partida, normalmente aberto e outro para desligar ou de parada, normalmente fechado.

Dispositivo de controle. — Quando o botão de partida "Pt", figura 116, é pressionado, momentaneamente fecha o contato, a bobina do contator "B" é energizada e fecha o contator, conseqüentemente, fecha-se também o contato auxiliar de auto-alimentação B_1 em pararelo com o botão de partida, permitindo que êste possa voltar à posição de aberto quando se retira o dedo do botão e continuar energizada a bobina do contator, permanecendo este fechado.

Para parar o motor, basta apertar o botão de parada "Pd". O contator "B" é desenergizado e desliga o motor da linha.

A figura 118 mostra o circuito de comando do diagrama da fig. 116.

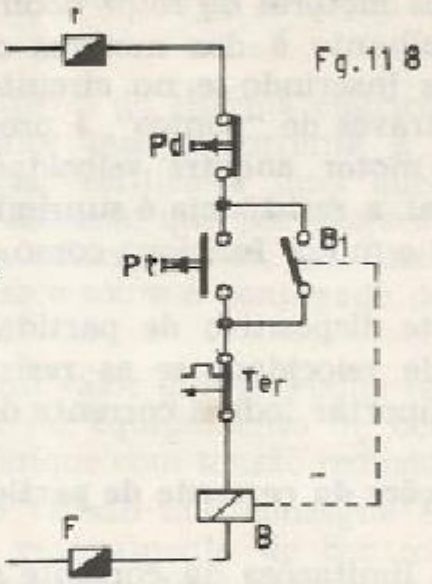


Fig. 118 — Diagrama de comando da fig. 116.

Proteção contra curto-circuitos. — A proteção do motor contra curto-circuitos é obtida pelos fusíveis "F".

Proteção contra sobrecarga. — É efetuada por três relés térmicos "Ter" de desligamento retardado em função da sobrecarga. Os relés de sobrecarga devem ser ajustados normalmente para o valor da corrente nominal da carga do motor. O relé térmico entra em ação ou por uma pequena sobrecarga de longa duração, ou por uma forte sobrecarga ainda que de curta duração. O relé térmico é ligado em série com os enrolamentos do motor, protegendo este, quer esteja ligado em estrela ou em triângulo.

Proteção contra subtensão. — A proteção de subtensão é inerente ao esquema de controle indicado nas figs. 116 e 117, porque no caso de quedas elevadas de tensão acima do valor permitido ou por falta total da tensão, a chave magnética e o contato de auto-alimentação abrirão. Se a tensão for normalizada ou restabelecida, a bobina do contator só será energizada quando se apertar novamente o botão de partida, obtendo-se assim uma proteção de subtensão.

Arranque de motores com chave estrela-triângulo.

A partida estrela triângulo é bastante freqüente, por se ter comportado plenamente satisfatória em todos os casos em que a partida não foi feita sob carga.

Os motores trifásicos acima de 3 a 5 cv, aproximadamente, são postos em marcha com tensão reduzida para atenuar a perturbação produzida na linha de alimentação, pela grande corrente de arranque e baixo fator de potência deste tipo de motor.

Nos motores entre 3 e 50 cv aproximadamente, o sistema mais empregado para limitar a corrente de arranque é o da partida em estrela-triângulo, e duas são as formas de ligação do motor à linha, isto é, os enrolamentos das três fases se mantêm separados entre si, e do motor saem seis condutores, tendo assim a possibilidade de ser ligado em estrela ou triângulo. Devido a essa possibilidade de comutação, o motor se adapta a duas diferentes tensões da rede: triângulo ou estrela, esta, 1,732 vezes maior do que aquela

Na placa do motor são indicados para a tensão do estator dois valores, dos quais o menor se refere a ligação triângulo e o maior a ligação estrela, por exemplo: 220/380 V, 380/660 V, 440/760 V, 500/866 V, etc., isto é, podem ter arranque tipo estrela-triângulo em 220, 380, 440 ou 500 volts respectivamente.

Para que o sistema de arranque estrela-triângulo possa ser aplicado, o motor deve corresponder com sua tensão em triângulo à tensão da rede. Assim, um motor, com o enrolamento comum para 220/380 V de tensão nominal, só poderá ser arrancado pela ligação estrela-triângulo em uma rede trifásica de 220 V

Tensão reduzida.

Num motor de 220/380 V, ao conectar seu enrolamento em estrela em uma linha de 220 V, a tensão em cada bobinamento será:

$$220/\sqrt{3} = 127 \text{ volts}$$

Portanto, a voltagem através de cada enrolamento é de somente 58% da voltagem da linha, quando os enrolamentos estão conectados em estrela, na posição de partida. Atingida uma rotação de 75% aproximadamente da velocidade síncrona, a chave passa à posição triângulo, ou seja, 220 V. Daí o nome do sistema, partida com tensão reduzida. A corrente consumida da rede é, na ligação triângulo, 173 vezes mais alta do que na ligação estrela.

Corrente reduzida.

Como na posição estrela, as ligações internas do motor correspondem à tensão mais elevada, a corrente de partida, pelo uso de uma chave estrela-triângulo, é reduzida praticamente a um terço de sua granceza que resultaria no caso da ligação direta em triângulo. Assim, por exemplo, dando partida a um motor de 380/660 V com o enrolamento ligado em estrela como se indica na fig. 119, sendo a tensão da rede de 380 V, a voltagem que corresponderá a cada fase do motor durante a partida será:

$$\text{Tensão da fase em estrela} = \frac{\text{Tensão da rede}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220 \text{ V}$$

Suponhamos que a impedância "Z" do enrolamento de cada fase seja de 20 ohms.

$$\text{Corrente de fase em estrela} = \frac{\text{Tensão de fase em estrela}}{\text{Impedância de fase}} = \frac{220}{20} = 11 \text{ A.}$$

Sabe-se que na conexão estrela a corrente na linha é igual à corrente em cada fase do motor (sem levar em consideração as correntes de arranque), a corrente consumida pelo motor no final da partida será de 11 ampères.

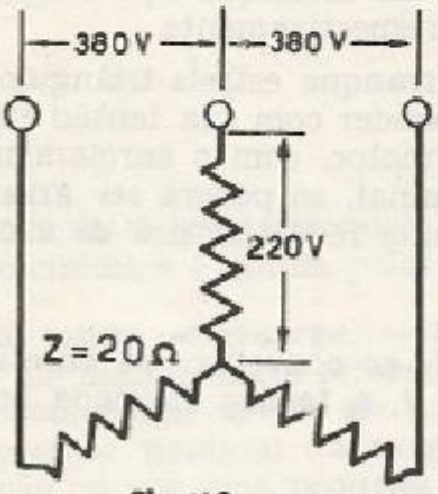


Fig.119

Fig. 119 — Ligação estrela para redução de corrente.

Na fig. 120, temos o mesmo motor conectado em triângulo e ligado à mesma tensão de 380 V. Na conexão triângulo a tensão da linha é igual à tensão de fase, e a corrente em qualquer fase do motor será:

$$\text{Corrente de linha em triângulo} = \frac{\text{Tensão de fase em triângulo}}{\text{Impedância de fase}} = \frac{380}{20} = 19 \text{ A}$$

Como na ligação triângulo a corrente de fase é igual a 1,73 vezes a corrente de linha, teremos que o motor consumirá da rede uma corrente de:

Corrente de fase em triângulo = 19 . 1,73 = 32,87 Ampères.

Como se vê pelo exemplo acima, iniciando a partida com o motor conectado em estrela, a corrente de partida na linha é 1/3 vezes à corrente de plena carga.

A chave estrela-triângulo é utilizada nos casos de arranque em vazio ou quando o momento de carga na partida não ultrapassar 50% aproximadamente do momento nominal do motor.

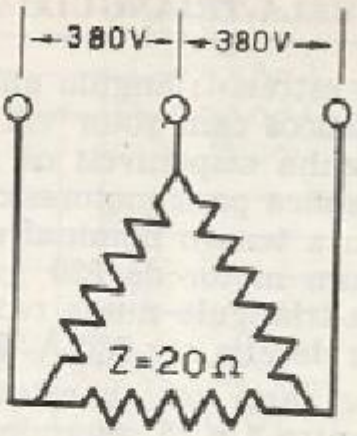


Fig. 120 — Conexão em triângulo para redução de tensão.

Fig.120

Com o emprego da chave estrela-triângulo, cuja característica é a de reduzir a um terço a corrente de partida (conforme foi explicado acima), reduzindo, porém, também na mesma proporção o conjugado do motor. Normalmente usam-se motores com rotor em dupla gaiola de esquilo, que têm baixa corrente de partida e poderoso momento de arranque.

A comutação do enrolamento do estator de estrela para triângulo durante o arranque pode ser realizada somente nos motores que funcionam normalmente ligados em triângulo.

O diagrama da fig. 121, mostra o esquema de uma chave estrela-triângulo.

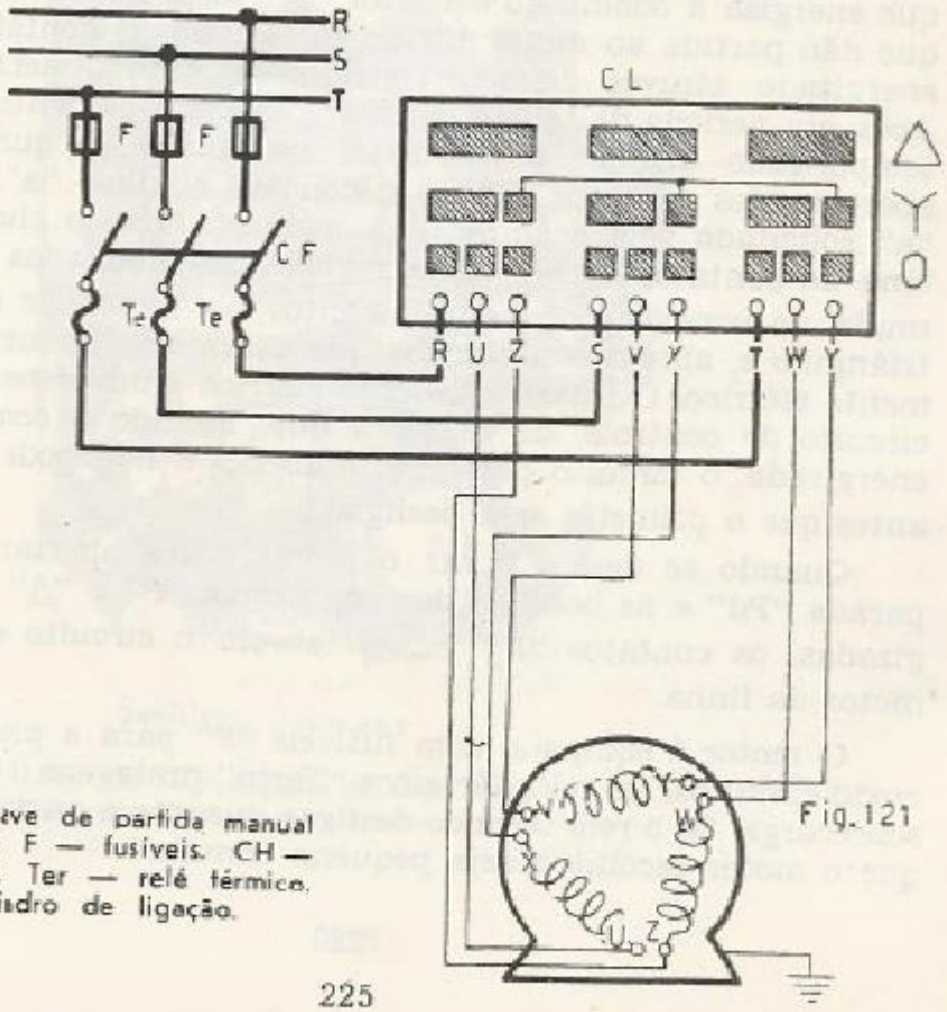


Fig. 121 — Chave de partida manual estrela-triângulo. F — fusíveis. CH — chaves de faca. Ter — relé térmico. CL — cilindro de ligação.

Fig.121

CHAVE ESTRELA-TRIÂNGULO AUTOMATICA

A chave estrela-triângulo automática destina-se à partida de motores trifásicos com rotor em curto-circuito, cujo enrolamento do estator tenha disponíveis os seis terminais das bobinas. Esta chave só se aplica para motores cuja tensão nominal em triângulo coincida com a tensão nominal entre fases da linha de alimentação. Assim um motor de 220 Δ/380 Y não pode ser ligado com chave estrela-triângulo numa rede de 380 V entre fases. Para esta rede o motor deveria ser 380 Δ/600 Y.

O motor parte com o estator ligado em estrela e após um período de entre 3 e 25 segundos (o tempo deve ser escolhido de tal forma que o motor tenha atingido sua rotação normal antes da mudança para triângulo) automaticamente, através de um relé temporizado disposto no circuito de controle, passa a operar ligado em triângulo.

Controle da chave estrela-triângulo

A fig. 122, ilustra as conexões para uma chave de partida em estrela-triângulo. Quando o botão de partida "Pt" é pressionado, o contator "Y" é energizado, possuindo este um elemento térmico temporizado que tem como função abrir com retardamento o dito contator. Quando se fecham os contatos principais "Y_c" do contator "Y", fecha-se também o contato auxiliar "a" que energiza a bobina do contator "P", fechando os contatos "P_c" que dão partida ao motor ligado em estrela. O contator "P" fica energizado através de seu contato de auto-alimentação "P_1". Após um período de tempo definido, automaticamente o elemento temporizado de "Y" desenergiza sua bobina, o que resulta na abertura dos contatos "Y_c" e o contato auxiliar "a". O contato "a" solicitado pela ação de uma mola energiza o circuito da bobina do contator "Δ" e fecha os contatos marcados "Δ_c", o que muda as conexões dos enrolamentos do motor de estrela para triângulo e, abre o contato "b" que como o "a" é um intertravamento elétrico. O intertravamento elétrico é um sistema usado no circuito de controle, de maneira que, quando o contator "Y" é energizado, o circuito para "Δ" é aberto e não pode ser fechado antes que o primeiro seja desligado.

Quando se deseja parar o motor basta apertar o botão de parada "Pd" e as bobinas dos contatores "P" e "Δ" são desenergizadas, os contatos "P_c" e "Δ_c" abrem o circuito e desligam o motor da linha.

O motor é equipado com fusíveis "F" para a proteção contra curto-circuitos. Os relés térmicos "Term" protegem o motor contra sobrecarga. Se o relé térmico desligar durante a partida é provável que o motor escolhido seja pequeno demais.

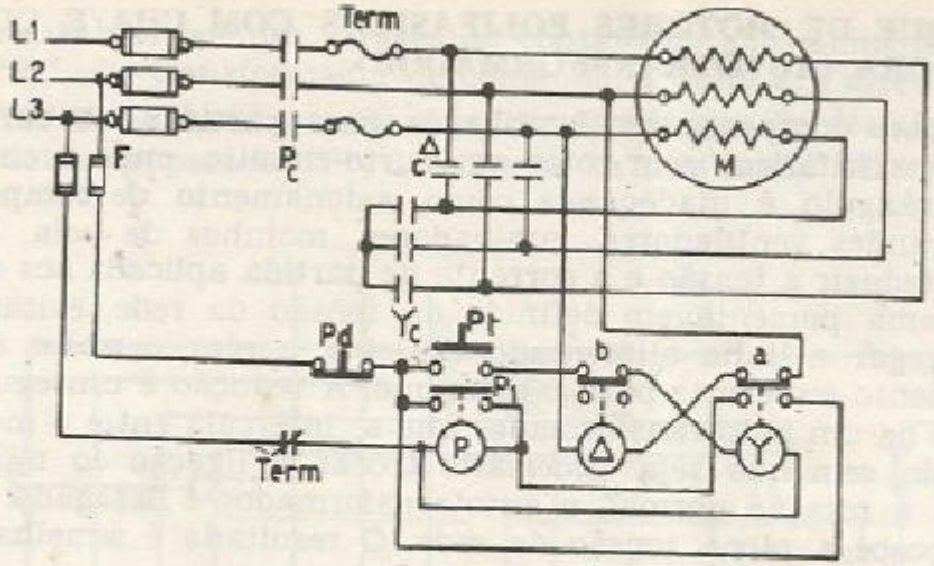
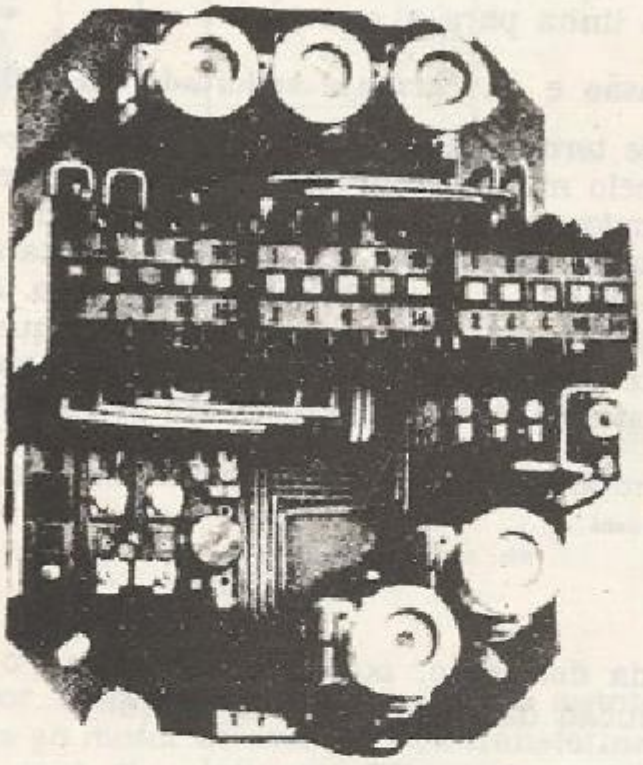


Fig. 122

Fig. 122 — Chave estrela-triângulo automática.

As chaves que ligam em estrela e triângulo são intertravadas, além de eletricamente, também mecanicamente.

A fig. 123, mostra a fotografia de uma chave automática estrela-triângulo.



Sentileza Siemens

Fig. 123 — Fotografia de uma chave automática e estrela-triângulo.

ARRANQUE DE MOTORES POLIFASICOS COM CHAVE COMPENSADORA (AUTOTRANSFORMADOR)

A chave compensadora é utilizada para partidas sob cargas de motores trifásicos com rotor em curto-circuito, onde a chave estrela-triângulo é inadequada como, acionamento de compressores grandes ventiladores, laminadores, moinhos de bola, etc. Permite reduzir a tensão e a corrente de partida aplicada aos motores a uma porcentagem definida da tensão da rede, evitando sobrecarregar a linha alimentadora. Deixa, porém, o motor com um momento suficiente para o arranque. A redução é conseguida por meio de um autotransformador que se intercala entre o motor e a linha, sem que seja necessário trocar a ligação do motor. Atingida a rotação normal, o autotransformador é desligado e o motor recebe a plena tensão da rede. O resultado é semelhante ao da chave estrela-triângulo.

Para este fim são sempre usados autotransformadores, porque a razão não é nunca superior a 2, e quando a razão é pequena resultam muito mais baratos que os transformadores de dois enrolamentos.

O autotransformador é essencialmente um transformador que possui normalmente três derivações abaixadoras e um dispositivo seletor que conecta o motor ao transformador para a partida, e diretamente à linha para a marcha.

Redução da tensão e da corrente solicitada da linha. Momento.

A tensão nos terminais do motor, bem como a corrente reduzida solicitada pelo mesmo durante a partida, ocorre no secundário do autotransformador. Esta corrente, porém, reflete-se no primário do autotransformador (linha de alimentação), reduzida mais uma vez, segundo a relação de transformação. A corrente de partida solicitada da rede e o momento de arranque variam com o quadrado da tensão aplicada aos terminais do motor. Os valores para a redução standard nas derivações são as seguintes:

DERIVAÇÃO DO AUTOTRANSF.	CORRENTE DE PARTIDA	MOMENTO DE ARRANQUE
% da tensão da linha	% do normal	% do normal
50 %	25 %	25 %
65 %	42 %	42 %
80 %	64 %	64 %

A escolha da derivação, portanto, determina o momento de partica e a redução da corrente de arranque.

Chave compensadora de partida manual

As conexões para a chave compensadora de partida manual, estão ilustradas na fig. 124. Quando o botão de partida "I" é pressionado sobre os contatos 1 — 2 energizam-se as bobinas F, Y e T. Embora se liberte o contato 1 — 2, continua passando

corrente nas bobinas através do contato de auto-alimentação "a" de "F". Do transformador de comando, a linha t_2 é direta a todas as bobinas e t_1 chega até as mesmas através do térmico "Ter", do botão de parada "P", do contato "a", do botão "II" e do contato "c".

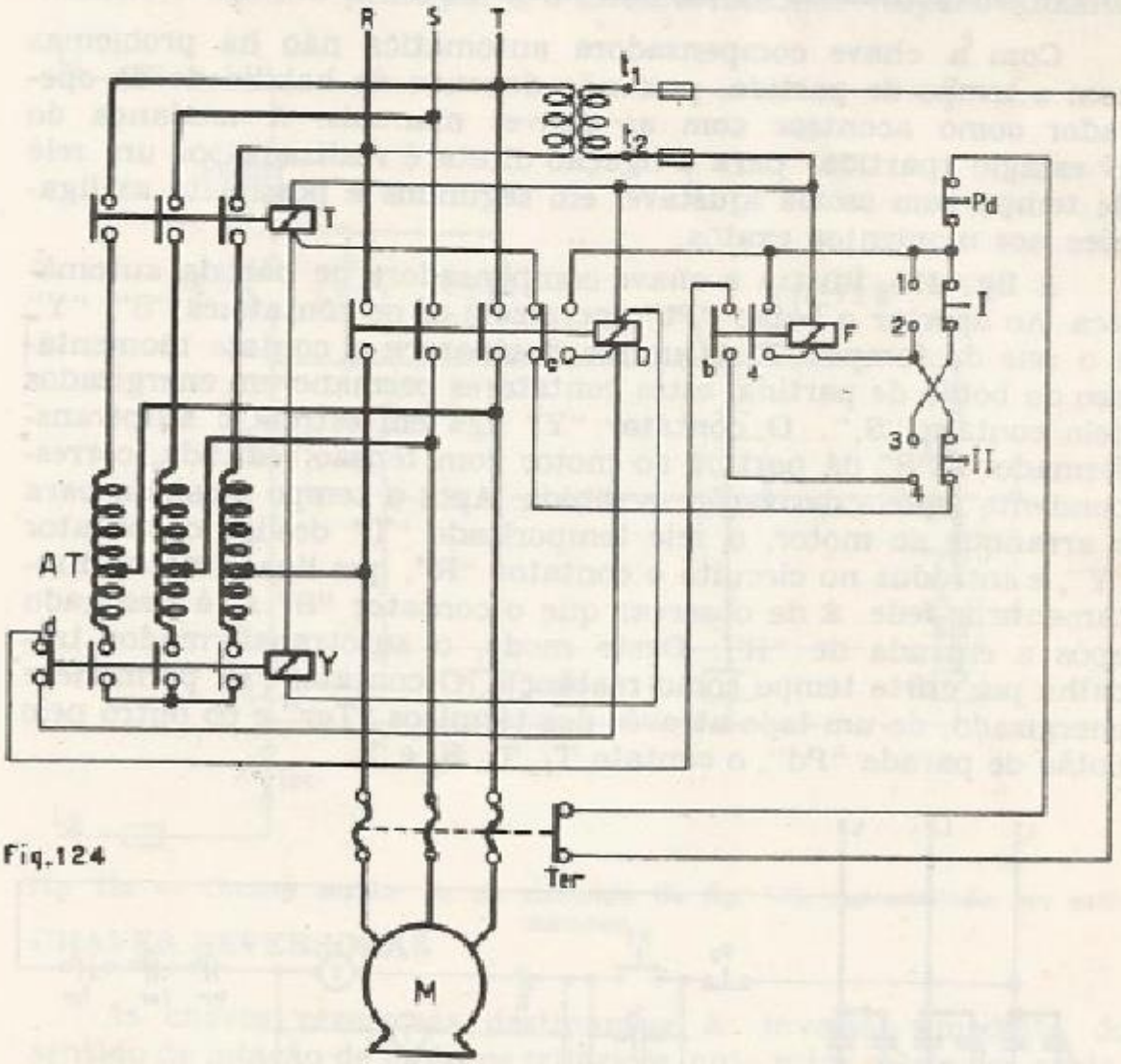


Fig.124

Fig. 124 — Chave compensadora de partida manual.

O contator Y fecha o ponto neutro do autotransformador e o T dá partida ao motor através do autotransformador com tensão inferior à nominal. Os contatores ficam energizados até a rotação do motor estabilizar-se em valor um pouco inferior a rotação normal de funcionamento. Após transcorrido o período de partida, calca-se o botão "II" que desenergiza Y e T, e energiza a bobina D através do contato momentâneo 3 — 4 e dos contatos "b" e "d". Ao se fechar o contator D, fecha seu contato auxiliar de auto-ali-

mentação "c" e seus contatos principais, e o motor recebe a plena tensão da linha. Para parar basta apertar o botão de parada "Pd".

Para a proteção do motor contra as sobrecargas possui relés de corrente máxima "Ter". Estes são reguláveis, o que possibilita a calibragem para o valor da corrente nominal do motor.

Chave compensadora de partida automática

Com a chave compensadora automática não há problemas com o tempo de partida, pois não depende da habilidade do operador como acontece com as chaves manuais. A mudança do 1º estágio (partida) para a ligação direta é realizada por um relé de tempo com escala ajustável em segundos e possibilita as ligações nos momentos exatos.

A fig. 125 ilustra a chave compensadora de partida automática. Ao apertar o botão "Pt" energizam-se os contatores "S", "Y" e o relé de tempo "T". Quando desaparece o contato momentâneo do botão de partida, estes contatores permanecem energizados pelo contato "S_1". O contator "Y" liga em estrela o autotransformador e "S" dá partida ao motor com tensão reduzida, correspondente àquela derivação escolhida. Após o tempo ajustado para o arranque do motor, o relé temporizado "T" desliga o contator "Y", e introduz no circuito o contator "R", que liga o motor diretamente à rede. É de observar que o contator "S" só é desligado após a entrada de "R". Deste modo, o autotransformador trabalha por curto tempo como reatância. O contator "R" permanece energizado; de um lado através dos térmicos "Ter" e do outro pelo botão de parada "Pd", o contato T_3, T_2, S_2 e T_5.

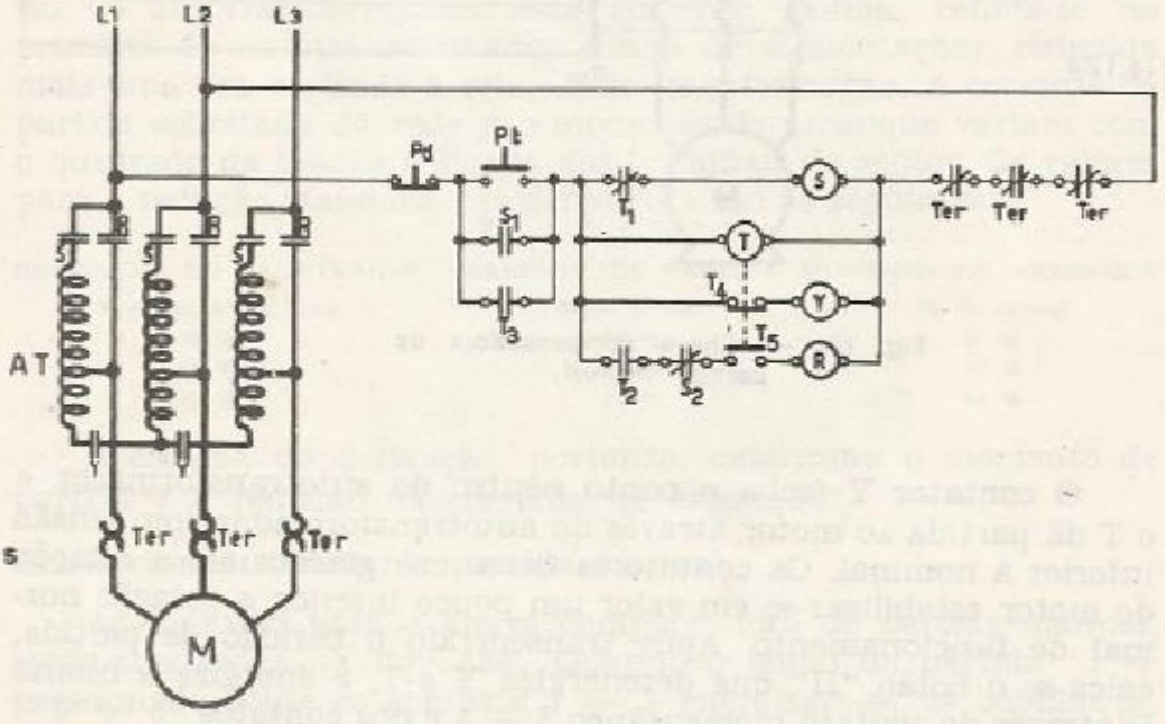


Fig. 125

Fig. 125 — Chave compensadora de partida automática.

Apertando-se o botão de parada "P" desenergiza-se o contator "R" e o relé "T", que abrem seus contatos instantaneamente, parando o motor. Também se pode pará-lo pela atuação dos relés de sobrecarga "Ter".

As figuras 108, 125 e 126 mostram o diagrama de funcionamento, o circuito principal e o circuito auxiliar respectivamente.

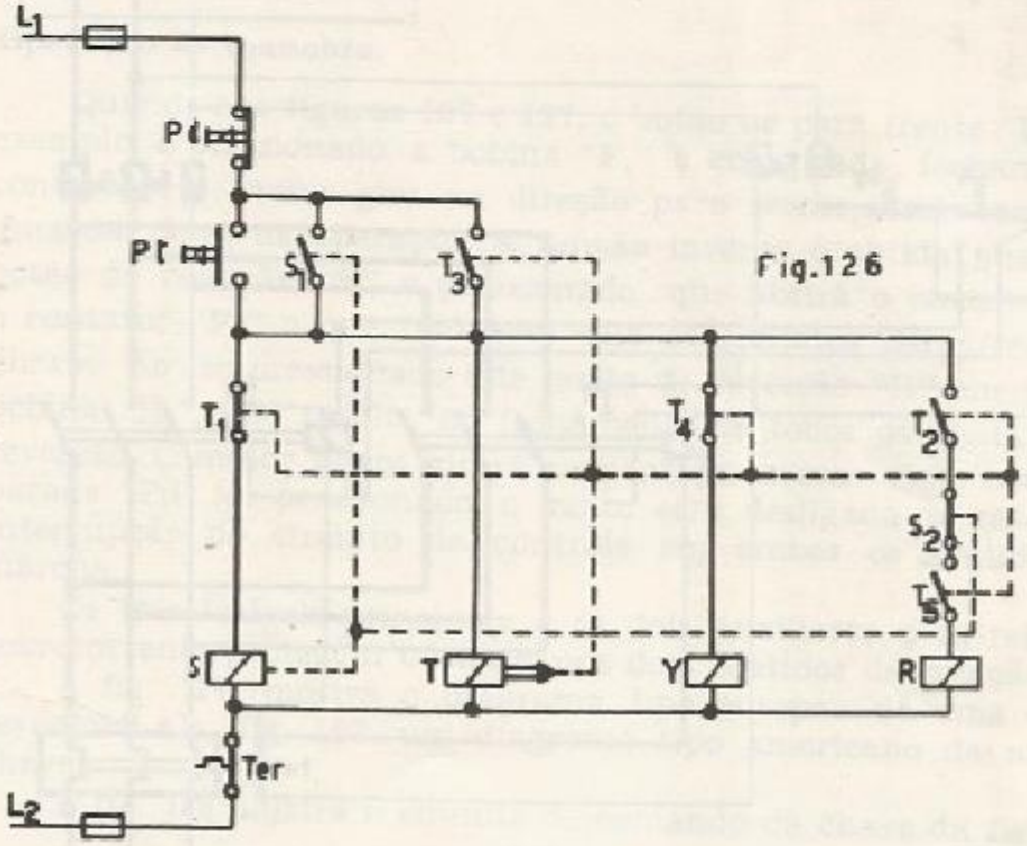


Fig.126

Fig. 126 — Circuito auxiliar ou de comando da fig. 125, representado em estilo europeu.

CHAVES REVERSORAS

As chaves reversoras destinam-se à: inversão imediata do sentido de rotação de motores trifásicos, cujo rotor esteja em curto-circuito; reversão de qualquer fonte de alimentação, etc. O controle é efetuado por uma botoneira de três botões: um para ligar em determinado sentido de rotação, outro para ligar em sentido oposto, e um terceiro para desligar. Um intertravamento mecânico e elétrico impede operações errôneas ou ligações simultâneas.

Em determinados trabalhos é necessario inverter o sentido de rotação do motor empregado. É o caso do torno mecânico, pontes rolantes, guinchos, elevadores, etc.

As figuras 107 e 127 ilustram um diagrama da fiação da chave reversível de um motor, pela combinação de dois contatores. As figuras 106 e 128 mostram os circuitos de comando das figuras 107 e 127 respectivamente.

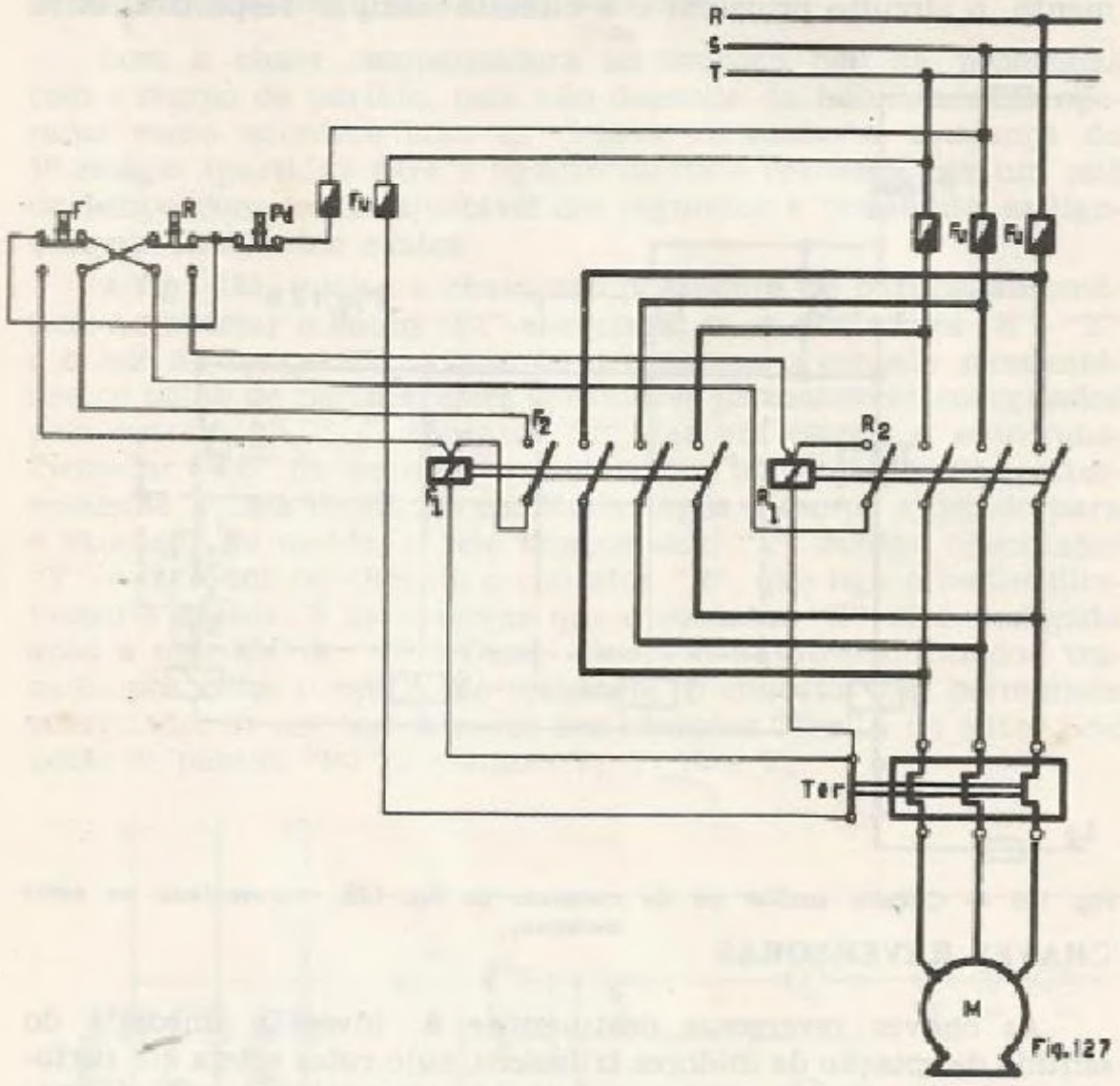


Fig. 127 — Esquema em estilo europeu de uma chave reversora para um motor de C.A.

Quando os três contatos principais de "inversão" estão fechados, a seqüência de fase nos terminais do motor é diferente daquela quando os três contatos principais de "para frente" estão fechados. Dois dos fios da linha que alimenta o motor são intercombinados. Embora se possa fazer a reversão invertendo-se apenas duas fases, empregam-se somente chaves reversoras que, no ponto neutro, seccionam as 3 fases.

O circuito de controle tem uma caixa de comando com três botões: de para frente "F", reversão "R" e parada "Pd". É necessário usar-se a interligação elétrica no circuito de controle, de maneira que, se um dos contatores é energizado, o circuito para o segundo contato é aberto e não pode ser fechado antes que o primeiro seja desligado, isto é, estão eletricamente travados entre si, de tal modo que resulta impossível a ligação simultânea de ambos.

Operação de manobra.

Quando nas figuras 107 e 127, o botão de para frente "F", por exemplo, é pressionado, a bobina "F_1" é energizada, fecham-se os contatos e o motor gira na direção para frente, está concluída uma das fases de operação. A função inversa é obtida quando o botão de reversão "R" é pressionado, que abrirá o circuito para o contator "F_1" o que fará com que os contatos para frente se abram. Ao ser pressionado este botão de reversão "R" energiza a bobina "R_1". Isto resulta no fechamento de todos os contatos de reversão. O motor agora girará no sentido inverso. Se o botão de parada "Pd' for pressionado, o motor será desligado da rede pela interrupção do circuito de controle em ambos os sentidos de marcha.

Os três fusíveis principais e os dois auxiliares e os relés de sobrecorrente protegem o motor nos dois sentidos de rotação.

A fig. 127 mostra o diagrama tipo europeu de uma chave reversora e a fig. 107 um diagrama tipo americano da mesma chave.

A fig. 128 ilustra o circuito de comando de chave da fig. 127.

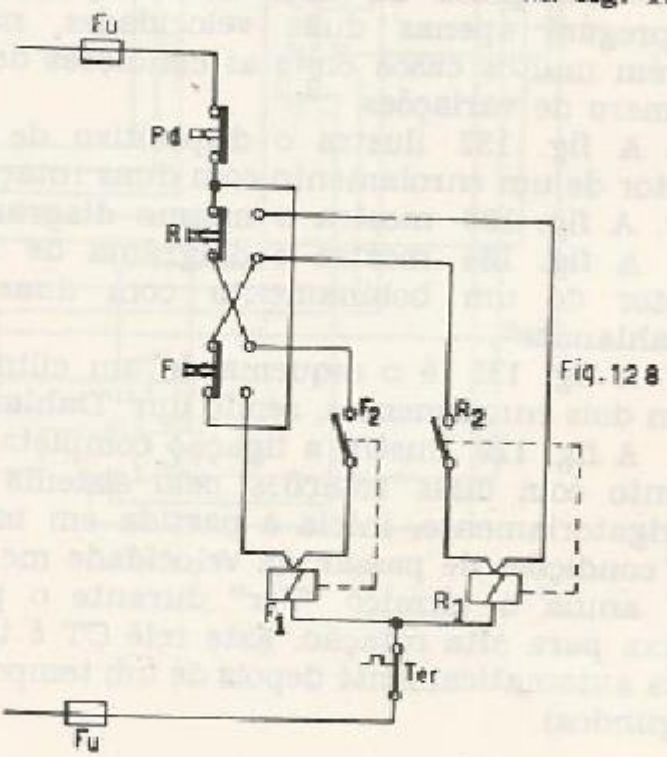


Fig. 128 — Circuito de comando da chave da fig. 127.

Fig. 128

Chaves para motores com variação de pólos.

As chaves para motores com variação de pólos são utilizadas para o arranque de motores trifásicos de rotor em curto-circuito. No estator pode ter um enrolamento comutável (ligação Dahlander), ou dois bobinamentos independentes, também utilizando a conexão Dahlander em cada um deles, obtendo-se assim quatro velocidades diferentes.

As chaves para motores de pólos reversíveis são idênticas, em princípio, às chaves de ligação direta para motores de uma rotação, mas são dotadas de bloqueio elétrico no circuito de comando, de modo a permitir a ligação de uma só rotação de cada vez.

Operação da chave para motores de duas velocidades.

Em condições normais pode ligar-se qualquer das rotações do motor, no entanto, quando se faz a ligação à linha de alimentação que não suportam a ligação dos motores na rotação máxima, a chave é construída de modo a permitir que a alta rotação seja ligada somente depois da rotação mais baixa ter sido ligada, figuras 129, 130 e 131.

O número de pólos e, portanto, o número de rotações de motores de duas velocidades com um enrolamento estão sempre na proporção de 1:2 sendo o número de pólos sempre um múltiplo de 4.

DISPOSITIVO DE COMUTAÇÃO POLAR PARA VARIAR A VELOCIDADE

Os motores tipo Dahlander são os mais usados para se variar adequadamente a velocidade, o que é feito pela modificação do número de pólos. Os casos mais freqüentes são aqueles em que se empregam apenas duas velocidades, não deixando de existir porém muitos casos onde as condições de trabalho exigem maior número de variações.

A fig. 132 ilustra o dispositivo de comando de ligação de motor de um enrolamento com duas rotações pelo sistema Dahlander. A fig. 133 mostra o mesmo diagrama em estilo americano.

A fig. 134 mostra o diagrama de ligação com reversão de motor de um bobinamento com duas rotações pelo sistema "Dahlander".

A fig. 135 é o esquema de um cilindro de ligação de motor com dois enrolamentos, sendo um "Dahlander", para três rotações.

A fig. 129 ilustra a ligação completa de motor de um enrolamento com duas rotações pelo sistema Dahlander. Este motor, obrigatoriamente, inicia a partida em baixa rotação. O relé "X" dá condições de passar da velocidade menor para a maior. O relé CT anula o térmico "Ter" durante o período da passagem de baixa para alta rotação. Este relé CT é temporizado e se desenergiza automaticamente depois de um tempo predeterminado (20 a 30 segundos).

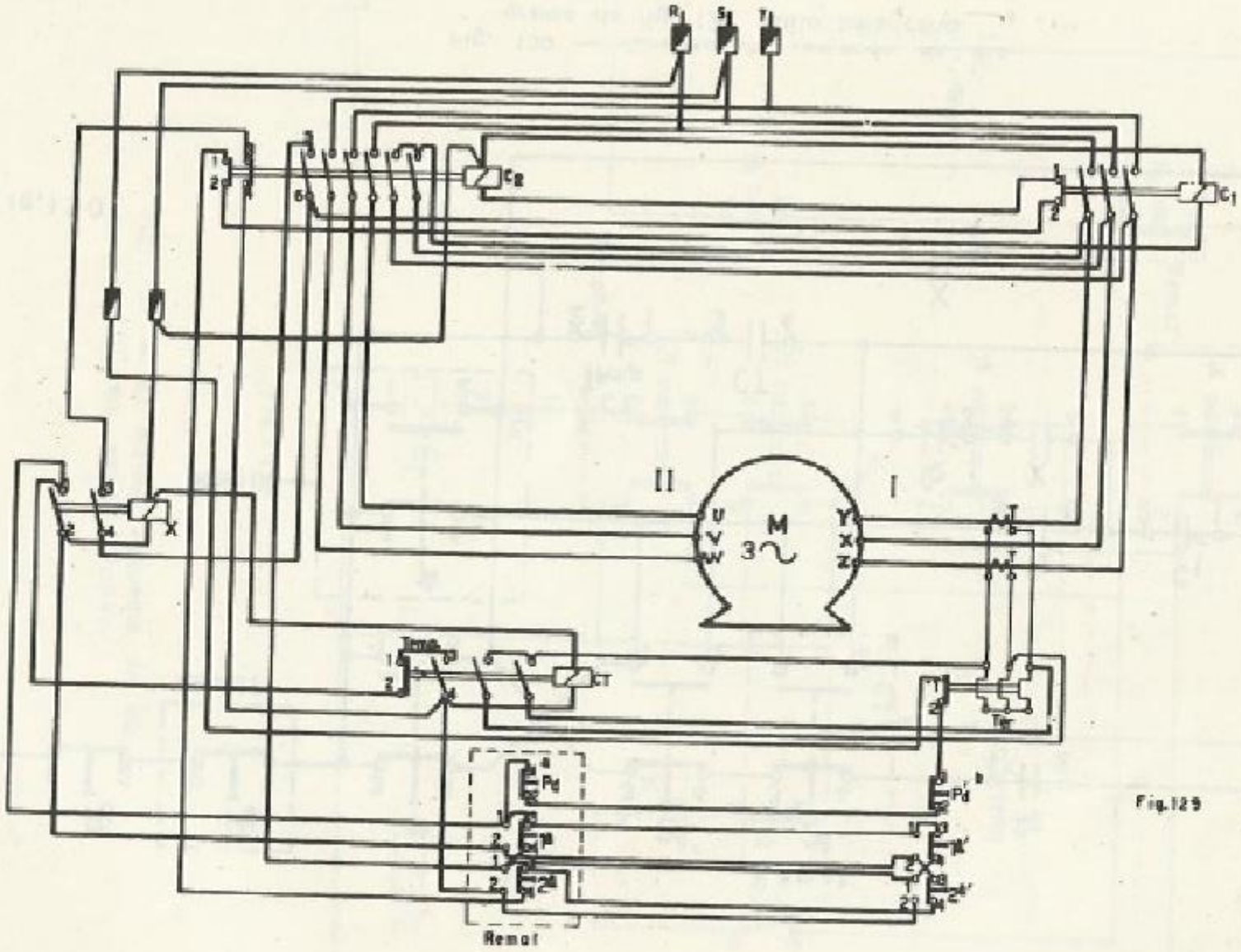


Fig.129

Fig. 129 — Diagrama de funcionamento de um motor, um só enrolamento, duas velocidades pelo sistema «Dahlander». F — fusível. Pa — parada. 1.ª, I — velocidade baixa. 2.ª, II — rotação alta. CT — contator auxiliar temporizado para anular o relé térmico durante a partida. C_1 — chave magnética de baixa velocidade. C_2 — contator de alta velocidade. T — transformador de corrente. Ter — relé térmico. X — relé auxiliar para a passagem obrigatória de baixa para alta velocidade. Remt — controle remoto. RST — ligação da rede. UVW e YXZ — conexões do motor. M — motor.

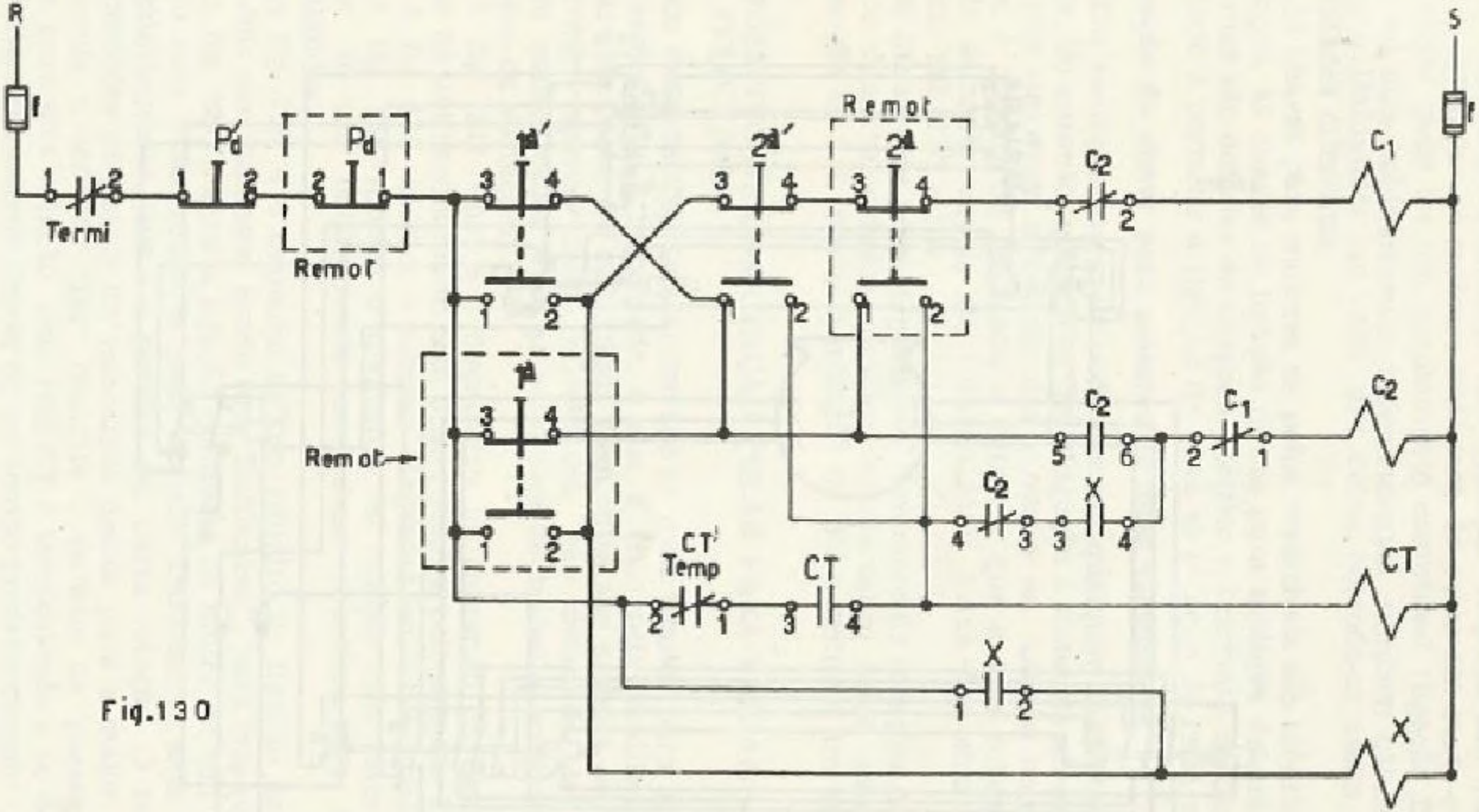


Fig.130

Fig. 130 — Circuito de comando do diagrama da fig. 129. Estilo americano.

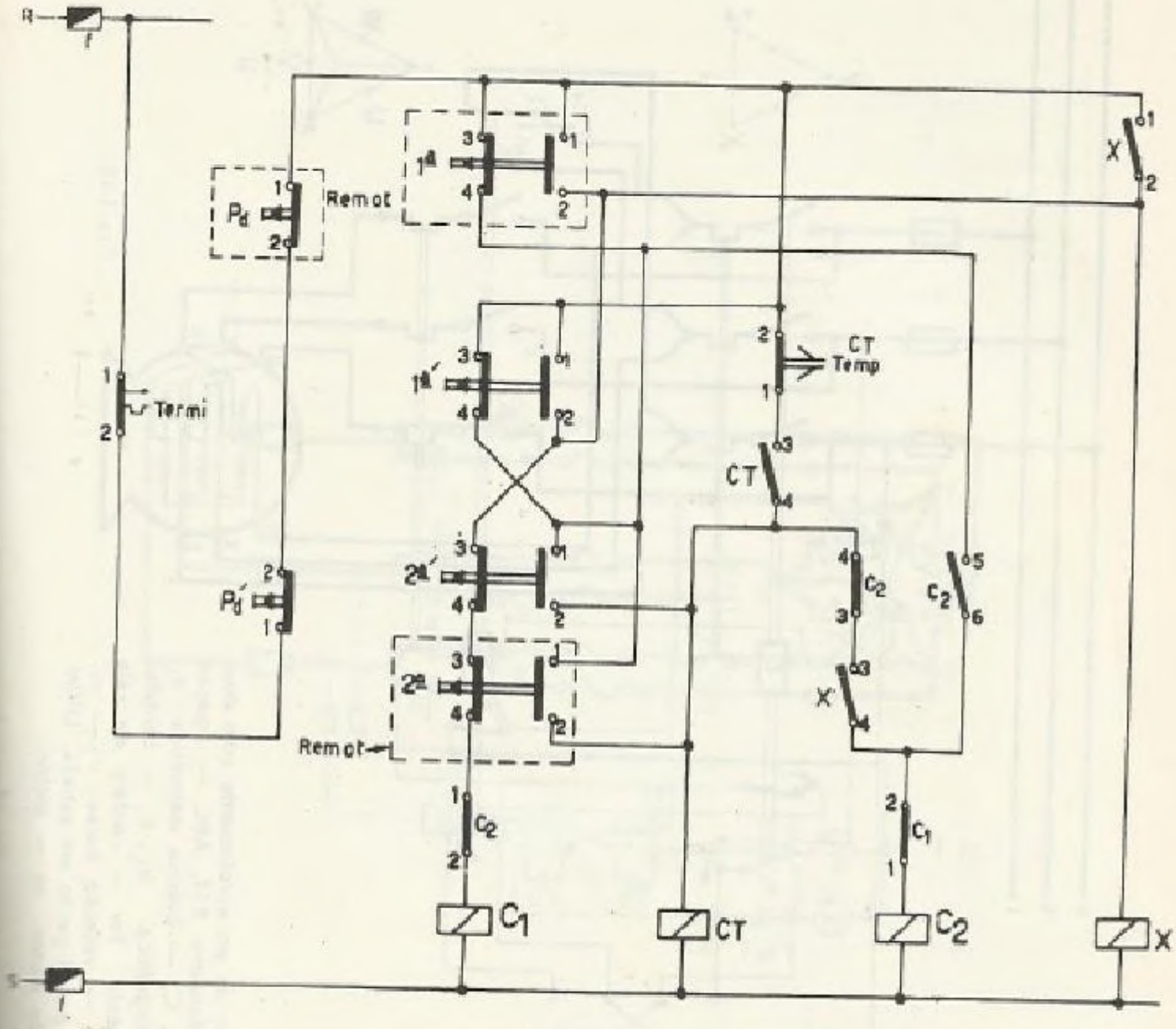


Fig.131

Fig. 131 — O mesmo esquema da fig. 130, em estilo europeu.

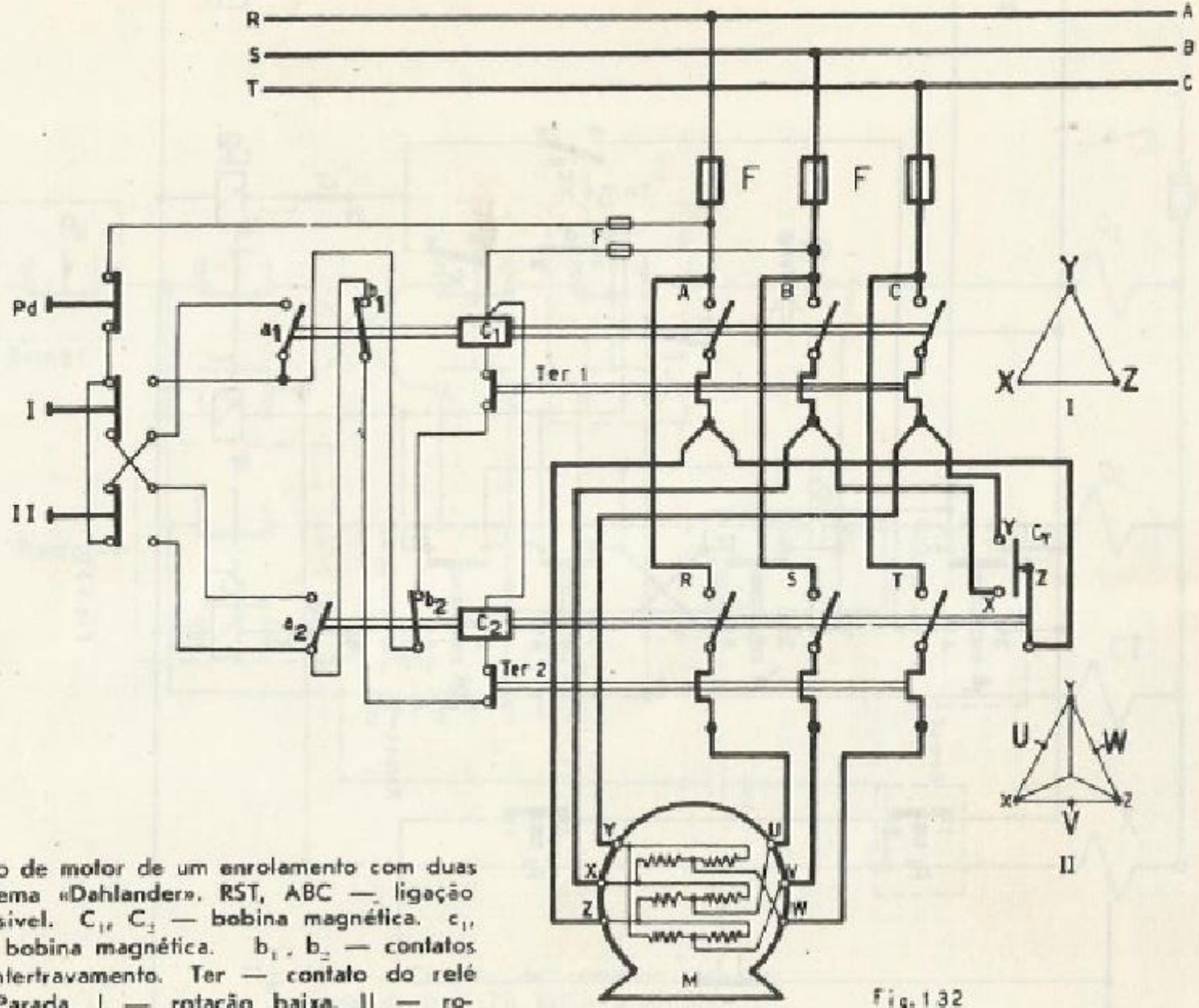


Fig. 132 — Ligação de motor de um enrolamento com duas rotações pelo sistema «Dahlander». RST, ABC — ligação da rede. F — fusivel. C_1, C_2 — bobina magnética. c_1, c_2 — contatos da bobina magnética. b_1, b_2 — contatos auxiliares e de intertravamento. Ter — contato do relé térmico. Pd — Parada. I — rotação baixa. II — rotação alta. Cy — contato para ligação em estrela. UVW ZXY — conexões do motor. M — motor.

Fig. 132

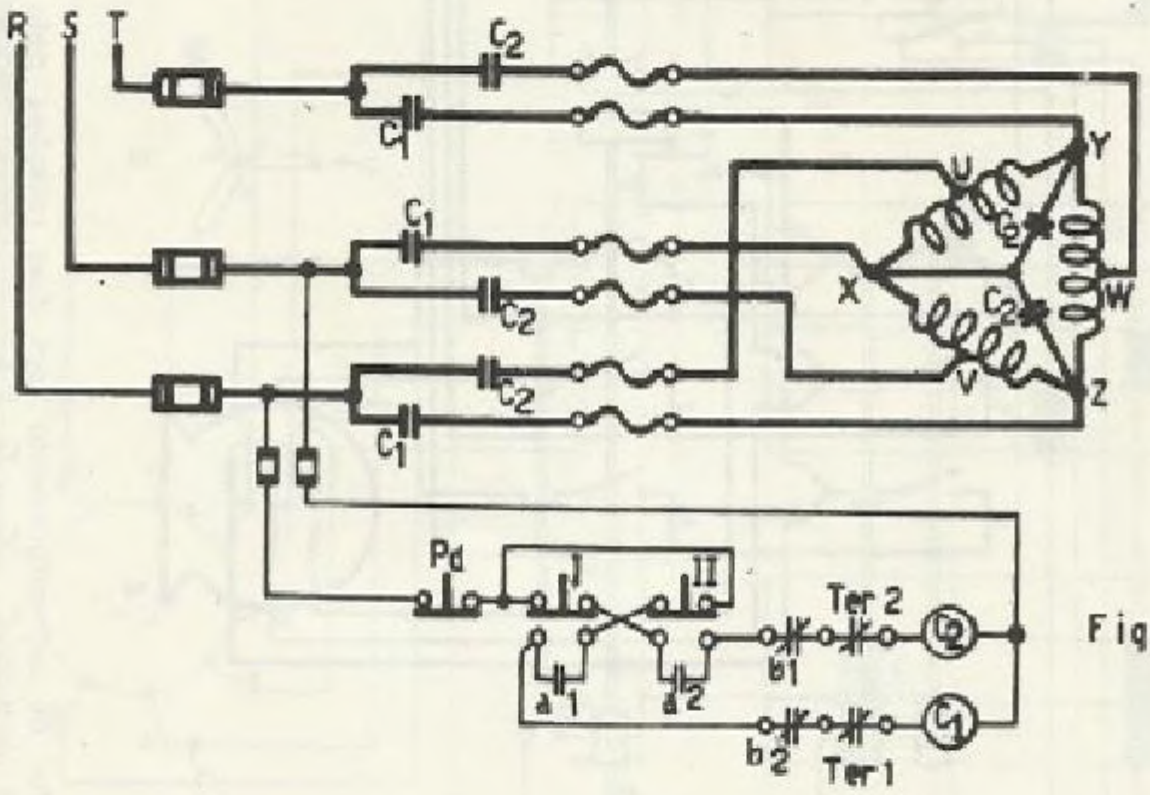


Fig.133

Fig. 133 — O mesmo diagrama da fig. 132, em estilo americano.

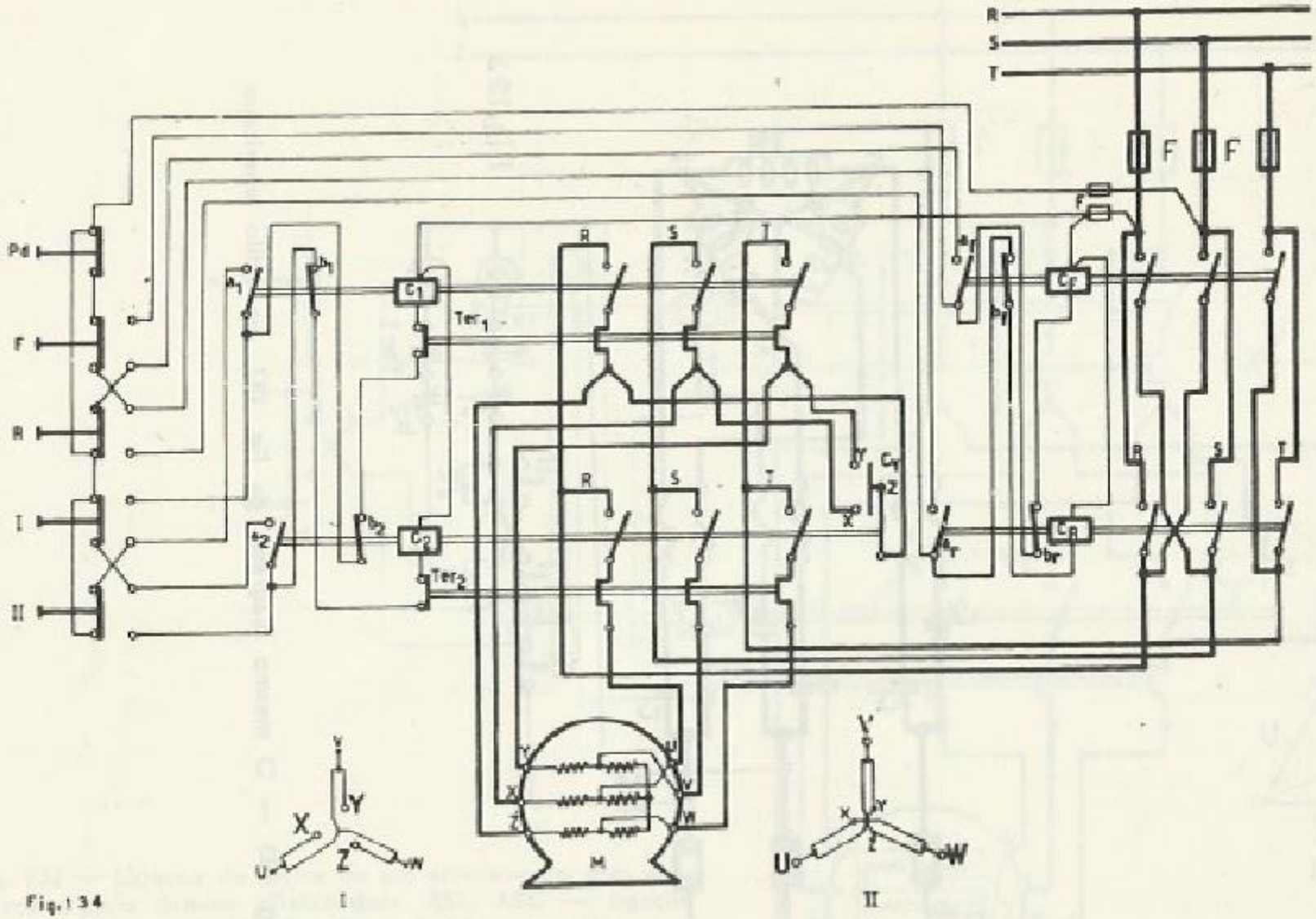


Fig. 134 — Ligação com reversão de motor de um enrolamento com duas rotações pelo sistema «Dahlender». RST — ligação da rêde. F — fusível. Ter — contato do re é térmico. C_1 , C_2 , C_Y , C_R , — chaves magnéticas. a_1 , a_2 , a_f , a_r , b_1 , b_2 , b_f , b_r — contatos auxiliares e de intertravamento. Pd — parada. F — sentido da rotação direita. R — sentido da rotação esquerda. I — rotação baixa. II — rotação alta. Cy — contato para estrela. M — motor. UVW ZXY — conexões do motor.

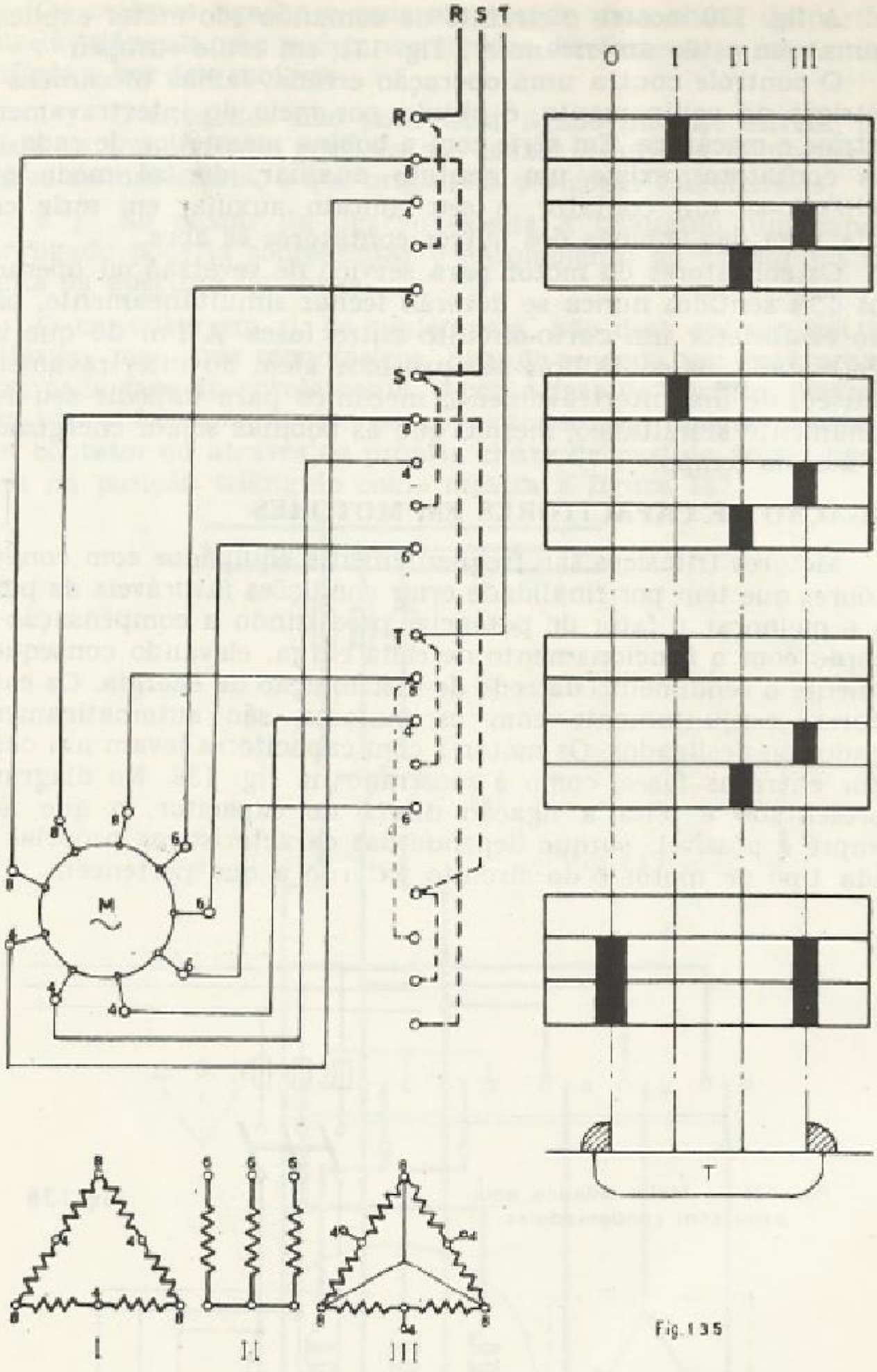


Fig. 135

Fig. 135 — Ligação de motor com dois enrolamentos, sendo um «Dahlander», para três rotações. O — desligado. I — rotação baixa ou um. II — rotação média ou dois. III — rotação alta ou três. T — topo do cilindro de ligação. RST — ligação da rede. M — motor.

A fig. 130 mostra o circuito de comando (do motor explicado acima) em estilo americano e a fig. 131, em estilo europeu.

O controle contra uma operação errada, falhas mecânicas ou elétricas do equipamento, é obtido por meio do intertravamento elétrico e mecânico. Em série com a bobina magnética de cada um dos contatores existe um contato auxiliar, de tal modo que, fechando-se um contator, o seu contato auxiliar em série com cada uma das bobinas dos outros contatores se abre.

Os contatores do motor para serviço de reversão ou operação nos dois sentidos nunca se deverão fechar simultaneamente, para não estabelecer um curto-circuito entre fases. A fim de que isto seja evitado, os contatores são providos além do intertravamento elétrico, de um intertravamento mecânico para impedir seu funcionamento simultâneo, mesmo que as bobinas sejam energizadas ao mesmo tempo.

LIGAÇÃO DE CAPACITORES EM MOTORES

Motores trifásicos são freqüentemente equipados com condensadores que têm por finalidade criar condições favoráveis de partida e melhorar o fator de potência, produzindo a compensação de acordo com o funcionamento de cada carga, elevando conseqüentemente o rendimento da rede de distribuição de energia. Os capacitores, conjuntamente com os motores, são automaticamente ligados ou desligados. Os motores com capacitores levam um capacitor entre as fases, como é mostrado na fig. 136. No diagrama apresentado é feita a ligação direta do capacitor, o que nem sempre é possível, porque depende das características próprias de cada tipo de motor e do circuito externo a que pertencem.

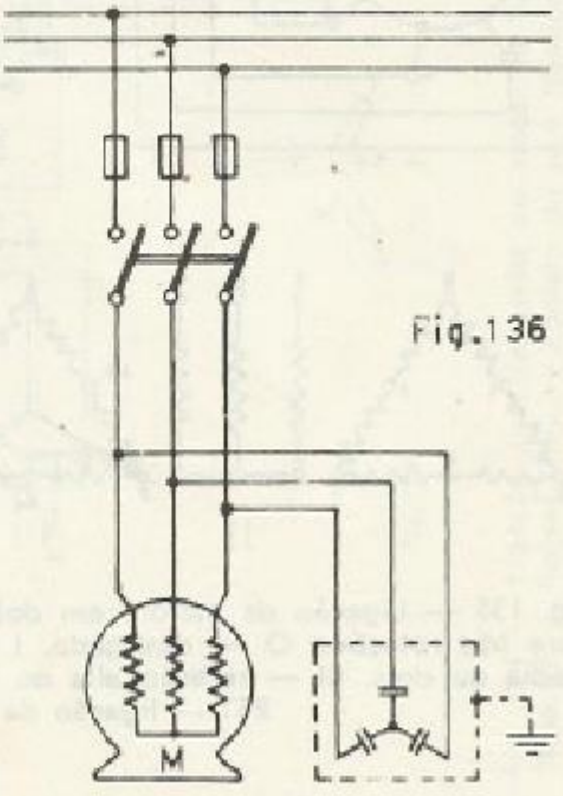


Fig. 136 — Motor trifásico equipado com condensadores.

Fig. 136

Os motores ligados à rede através de uma chave de partida estrela-triângulo não podem ser ligados diretamente a capacitores trifásicos por dois motivos:

1º) O capacitor não pode ficar ligado na fase estrela, pois nesta os componentes reativos são baixos e haveria compensação acima da necessária, o que originaria perigosas sobretensões;

2.º) Ao passar da ligação estrela à triângulo, um capacitor ligado poderia sobreexcitar o enrolamento do estator no instante da abertura da chave.

O capacitor em si, de preferência, não deve ser um do tipo trifásico, mas, três monofásicos, ligando-se cada um em paralelo com cada fase do enrolamento. Após a fase de partida, portanto em pleno funcionamento, os capacitores são ligados mediante um contator ou através da própria chave de partida ao ser ligada esta na posição triângulo como mostra a figura 137.

Fig.137

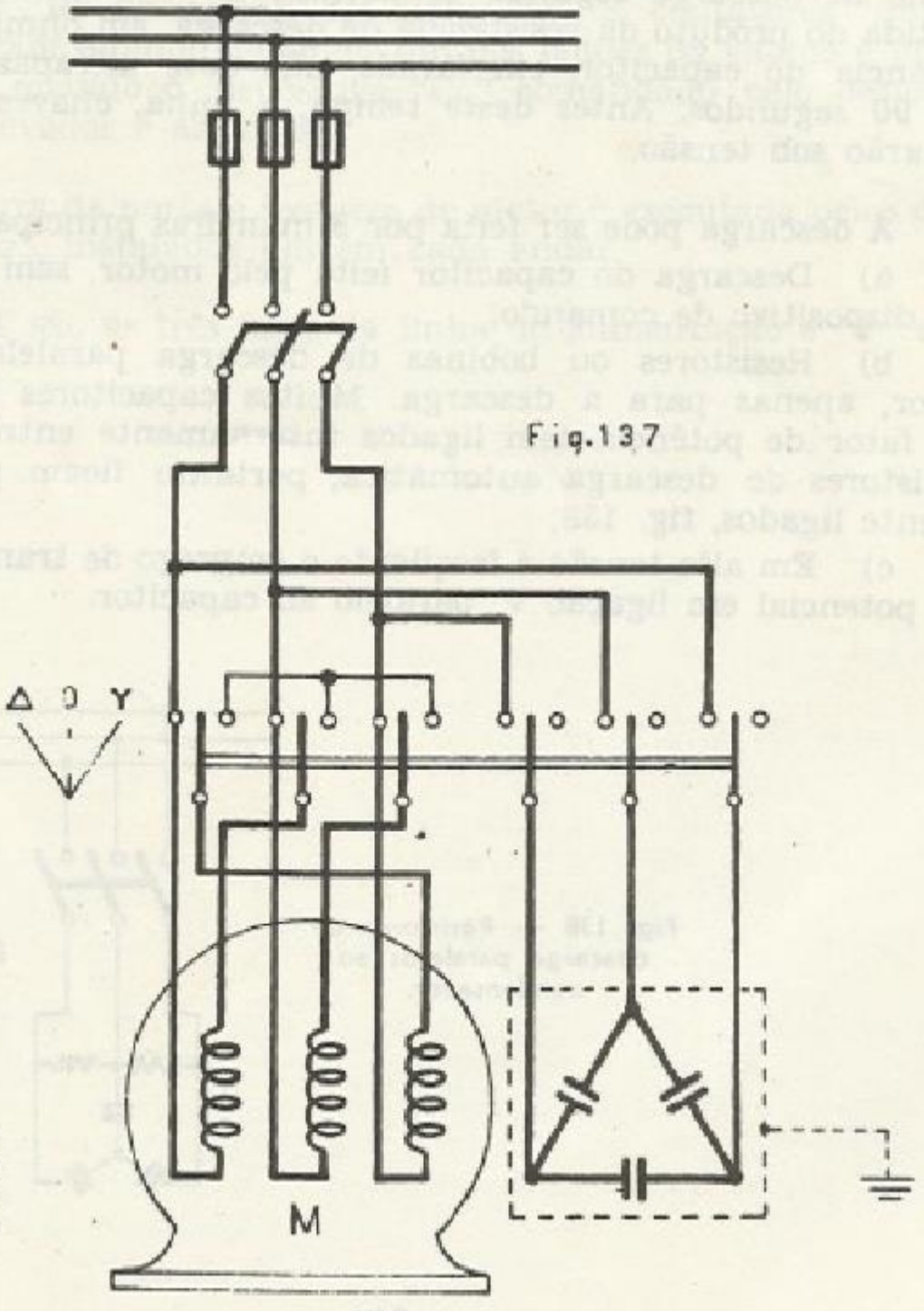


Fig. 137 — Diagrama de ligações de um motor de partida estrela-triângulo com condensador.

A aplicação de capacitores aos motores deverá ser feita cuidadosamente a fim de evitar uma compensação excessiva, pois neste caso poderão aparecer sobretensões e conjugados transitórios elevados, que poderão resultar do emprego de capacitores de capacidades demasiadamente elevadas e, podem levar outras cargas ligadas, como por exemplo lâmpadas à queima. Por esta razão, e porque quanto mais se aproxima o fator de potência da unidade tanto maior compensação é exigida para os mesmos benefícios, esta correção não pretende elevar seu valor até 1.

Descarga de capacitores.

Devido à elevada resistência interna, o capacitor quando desligado da rede, mantém ainda armazenada uma determinada quantidade de energia elétrica, a qual deverá ser dissipada para evitar descargas perigosas sobre o pessoal de serviço. O tempo máximo de descarga segundo as normas é: a constante de tempo, obtida do produto da resistência de descarga, em ohms, pela capacitância do capacitor, em farads, não deve ultrapassar o valor de 90 segundos. Antes deste tempo, a linha, chaves etc., ainda estarão sob tensão.

A descarga pode ser feita por 3 maneiras principais:

a) Descarga do capacitor feita pelo motor, sem necessidade de dispositivo de comando;

b) Resistores ou bobinas de descarga paralelos ao capacitor, apenas para a descarga. Muitos capacitores de correção de fator de potência tem ligados internamente entre terminais, resistores de descarga automática, portanto ficam permanentemente ligados, fig. 138;

c) Em alta tensão é freqüente o emprego de transformadores de potencial em ligação V, paralelo ao capacitor.

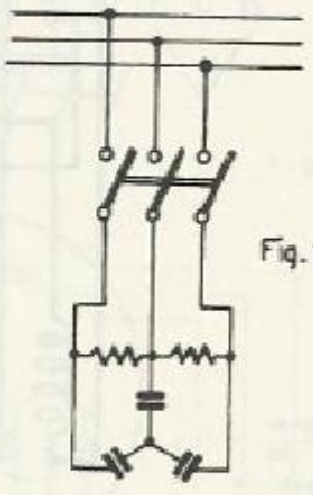


Fig. 138 — Resistores de descarga paralelos ao condensador.

Fig. 138

CUIDADO! Antes de tocar em partes vivas ou qualquer terminal recomenda-se desligar o capacitor do circuito e descarregá-lo, fechando seus bornes em curto-circuito, ao mesmo tempo que se mantém o capacitor aterrado.

Diagrama das ligações elétricas de um elevador.

No diagrama da fig. 139, está representado o esquema simplificado das ligações elétricas, de um elevador para quatro andares.

O motor "M" é comandado pelos botões "Bt" instalados no interior da cabine "Ca". A subida ou a descida do elevador é definida pelos contatores "Sb" (subida) e "Dd" (descida) encarregados do sentido da rotação do motor.

Os relés "R" trabalham em série com os contatores "Sb" e "Dd", e operam quando qualquer um dos botões da cabine é pressionado, ou quando o dispositivo "Co" comandado pelo deslocamento do elevador é acionado.

A abertura da porta e freagem do motor é executada pelos dispositivos "Co", instalados um em cada andar.

R, S e T são as três fases da linha de alimentação e "F" são os fusíveis.

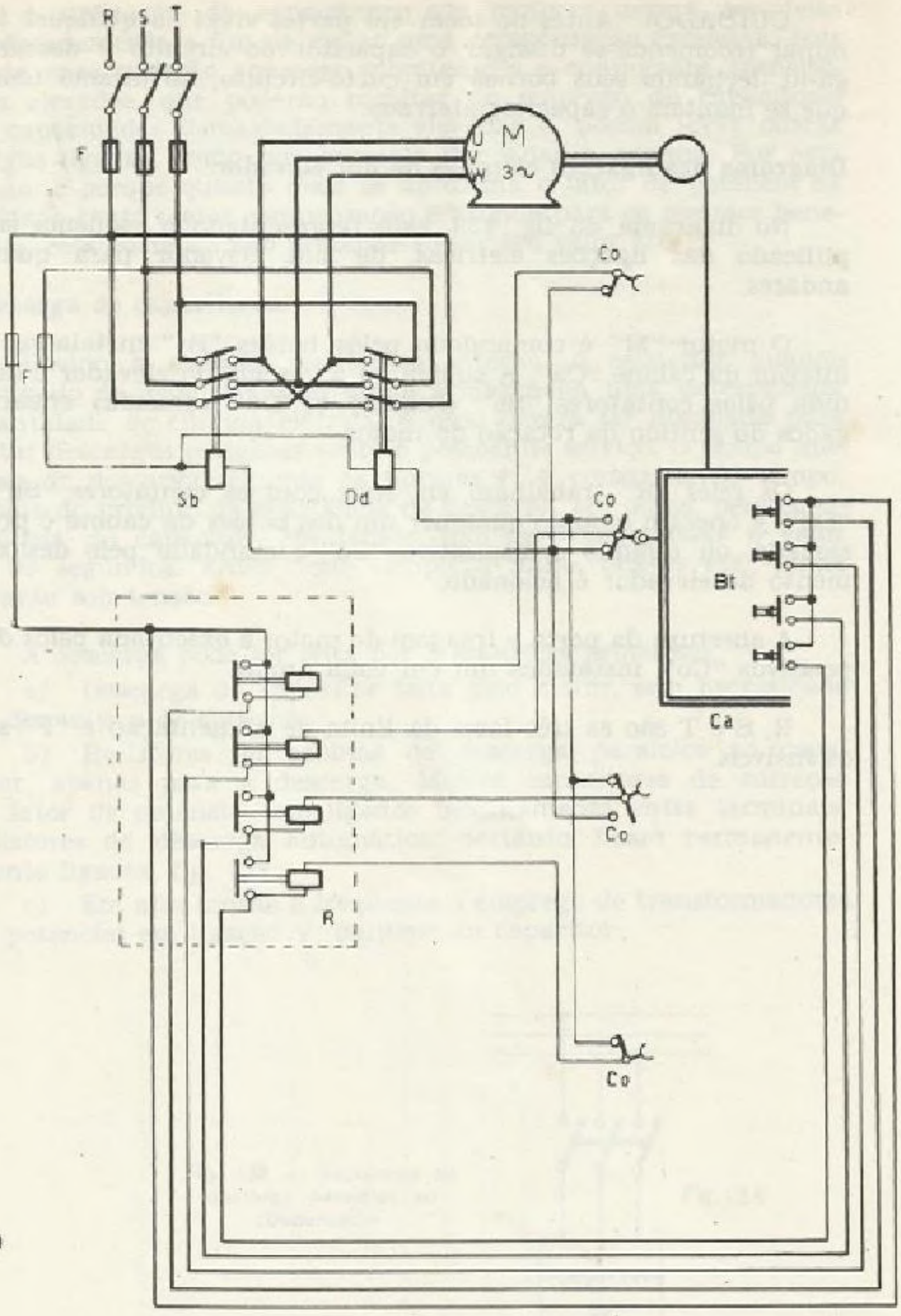


Fig. 139

Fig. 139 — Diagrama simplificado de um elevador para quatro andares

Capítulo 22

PROTEÇÃO DE MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA

Proteções.

A segurança de uma instalação elétrica contra os efeitos de possíveis alterações justifica que exista em cada motor um sistema de proteção que dependerá do tamanho e da finalidade a que se destina o mesmo e, que possa manter: uma ótima redução nas probabilidades de ocorrência de defeitos, um alto índice de continuidade de serviços, alta confiabilidade, manutenção simplificada e de baixo custo etc.

O sistema de proteção é constituído de diversos dispositivos protetores cuidadosamente coordenados, cada um com sua esfera de ação, mas que devem trabalhar coerentemente em conjunto, guardando entre si uma determinada relação a fim de evitar danos aos equipamentos e prevenir paralisações ocasionadas pela interrupção ou funcionamento inadequado da energia elétrica.

As correntes de falha que, conseqüentemente surgem, são muitas vezes maiores que a corrente nominal do motor, em virtude do fato da capacidade do circuito de alimentação exceder em muito a capacidade do motor.

Em geral são proteções contra: curto-circuitos, sobrecargas, superaquecimento do estator, proteção diferencial, subtensão, interrupção de uma fase, reversão de fase, inversão de energia, subvelocidade, perda de sincronismo, sobreaquecimento dos mancais, falhas para a terra, umidade, etc.

Proteção contra curto-circuito.

A proteção contra curto-circuito pode ser feita por: fusíveis, disjuntores, ou pela combinação de ambos.

Fusíveis. — Os fusíveis têm a função específica de interromper correntes de curto-circuito. É de operação tão rápida, que a corrente não tem a oportunidade de assumir o valor que atingiria se não existisse o fusível. Quanto maior é a corrente que atua sobre o circuito, mais rápida deve ser a atuação do fusível para não danificar este circuito e isolar a rede das correntes de curto-circuito.

Seleção do fusível. — O fusível deve ser escolhido para exercer sua função de interromper todas as sobrecorrentes que possam causar danos aos equipamentos e circuitos. Para a seleção dos fusíveis é necessário considerar: classe de tensão, corrente nominal do circuito, nível básico de isolamento, nível de curto-circuito na tensão considerada etc.

Vantagens do fusível. — Os fusíveis são os elementos de proteção mais antigos. Sua constituição é bastante simples. Eles mesmo detectam as correntes anormais. São de baixo custo, de fácil instalação e simplicidade de operação. Rapidez de ação. Segurança de atuação. Alta capacidade de interrupção, etc. São os dispositivos de proteção mais utilizados.

Desvantagens do fusível. — Num sistema trifásico, pode ocorrer um curto-circuito que funda apenas um dos fusíveis, deixando os outros dois intactos e o motor sendo alimentado unicamente com duas fases, o que é muito perigoso, principalmente se forem estas duas fases as que alimentam a bobina da chave magnética. Não reconhece defeitos de natureza transitória. Falta de precisão em sua operação. Falta de flexibilidade de suas características. Devido à necessidade de substituição quando ele opera, o tempo de interrupção do circuito é maior que nos outros dispositivos de proteção etc.

Disjuntores. — Os disjuntores são aparelhos que podem, em determinadas condições, interromper automaticamente ou não a corrente dos circuitos elétricos a que se acham ligados. Existem disjuntores ou chaves a óleo, a jato de ar etc.

Na realidade os disjuntores não protegem o motor, pois são dispositivos de comando, destinados a abrir o circuito simplesmente. Sua atuação de proteção é feita por intermédio de relés montados em ligação direta com o mecanismo disjuntor, formando um dispositivo de comando de proteção como normalmente é conhecido.

A função principal do disjuntor é a abertura automática das correntes de curto-circuito (para isolar o defeito e limitar a magnitude dos distúrbios do sistema) e a essa se associa a sua capacidade interruptora ou de ruptura.

Um pino de travamento retém, quando ligado, o disjuntor em sua posição. O destravamento é desfeito ou manualmente ou pela ação dos relés, quando a mola suspende o bloqueio, desligando instantaneamente o sistema de contatos do disjuntor.

Os relés acoplados aos disjuntores são de diversos tipos, operando em função de diferentes grandezas. Dependendo de seu funcionamento classificam-se em térmicos e eletromagnéticos.

Os relés térmicos são de ação relativamente rápida, mas nem sempre são acionados por "picos de corrente" cuja ínfima duração é insuficiente para influenciar os bimetais, porém, permite detectar as corrente de sobrecarga.

Os relés eletromagnéticos são sensíveis às correntes do motor e não são diretamente sensíveis a sua temperatura em virtude de estarem localizados em lugares afastados do motor. Detectam de forma instantânea as correntes de curto-circuito, tensões anormais etc.

Tanto o relé térmico como o eletromagnético estão associados a um sistema mecânico chamado disparador, cuja finalidade é a de atuar sobre o mecanismo dos contatos do disjuntor.

Seleção dos disjuntores. — A seleção dos disjuntores deve levar em consideração os seguintes fatores: tensão nominal do circuito, corrente de carga do circuito, corrente de curto-circuito no ponto de aplicação, freqüência da rede etc.

Vantagens dos disjuntores. — Abre automaticamente as três fases, isolando totalmente o motor da rede. Permite imediata religabilidade após o curto-circuito, uma vez eliminada a causa do defeito. É o dispositivo de proteção mais versátil. Tem capacidade de efetuar operações de manobras. Permite abrir repetidamente correntes anormais. Podem ser operados por controle remoto, etc.

Desvantagens dos disjuntores. — São muito mais caros do que os fusíveis. São mais lentos na supressão de correntes elevadas de curto-circuito do que os fusíveis. Têm sempre disparadores e relés para detectarem as sobrecorrentes ou curto-circuitos, etc.

Combinação de protetores.

A proteção contra curto-circuito é, por vezes, obtida conjugando-se fusíveis e disjuntores para obter uma proteção mais eficiente ao se coordenar devidamente suas características, para garantir a necessária seletividade e formar assim um sistema completo de proteção. Neste caso, os disjuntores operam para as sobrecorrentes abaixo de sua capacidade interruptora e para valores superiores. Os fusíveis interrompem as correntes de curto-circuito protegendo o próprio disjuntor.

Como os fusíveis são os melhores protetores contra as correntes de curto-circuito, devem ser aplicados como última proteção. Eles entram em ação quando a corrente atinge valores que possam causar danos ao disjuntor. Por isto os fusíveis são dotados de elevada capacidade de ruptura.

Proteção contra sobrecargas.

A principal diferença entre uma proteção contra sobrecargas e uma proteção contra curto-circuito é que a segunda é praticamente instantânea ao passo que a primeira é de ação retardada, podendo levar horas antes de atuar.

A sobrecarga, de um motor se traduz por um sobreaquecimento e, portanto, a proteção é feita contra o sobreaquecimento excessivo dos enrolamentos do estator.

O aquecimento do motor é conseqüência de perdas no ferro ativo e no enrolamento. Como as perdas no ferro são virtualmente constantes, sob tensão e freqüência estáveis, são praticamente as perdas no enrolamento que respondem pela alteração no aquecimento. Deduz-se disto que a temperatura constitui uma função da corrente circulante no motor, utilizando-se esta como grandeza a medir.

Como a continuidade de serviço é importante, conseqüentemente, a abertura da chave do motor, no caso de sobrecarga, deve ser retardada o maior tempo possível, sem exceder a capacidade térmica do mesmo.

O superaquecimento, qualquer que seja sua causa, é o que mais prejudica aos motores elétricos, podendo surgir por: queda de tensão, queda de freqüência, desequilíbrio das correntes (incluindo-se abertura de uma fase), ventilação precária, temperatura ambiente muito elevada, condições de partida bastante severas, elevado número de manobras, bloqueio do rotor, sobrecarga mecânica, etc. Se o motor não for desligado manual ou automaticamente haverá queima dos enrolamentos.

A sobrecarga resultante de uma queda geral na freqüência da linha de alimentação, é causada pelo fato de que a reatância indutiva do motor é reduzida pelo decréscimo da freqüência, provocando assim uma solicitação maior de corrente pelo motor, do circuito de alimentação. Isto conduz ao declínio da voltagem e conseqüentemente a um aumento da corrente de sobrecarga.

A proteção contra sobrecarga é geralmente efetuada por relés térmicos, que utilizam o efeito térmico da corrente elétrica. Este efeito se faz sentir sobre um elemento bimetálico que reage à ação do calor, sofrendo uma deflexão, cuja ação é sentida mecânica ou eletricamente sobre o circuito de comando do contator ou do disjuntor.

O tempo de funcionamento dos relés térmicos devem responder ao grau de retardamento conforme norma, ou seja, no mínimo de 5 segundos para 6 vezes a corrente nominal do motor em estado frio.

Os relés térmicos podem ser primários ou secundários, quanto a sua ligação ao circuito. Em ambos os casos seu funcionamento deve-se a curvatura que o elemento bimetálico sofre pelo calor resultante da circulação de uma sobrecorrente através do bimetal, ou do calor transmitido por uma bobina de um transformador de corrente colocada ao redor da lâmina bimetálica.

O relé térmico entra em ação, ou por uma pequena sobrecarga de longa duração, ou por uma forte sobrecarga ainda que de curta duração. Nos motores trifásicos, por exemplo, havendo interrupção de uma fase, a corrente aumentará imediatamente nas outras duas não afetadas. O relé desliga rápido e seguro em caso de falta de uma fase protegendo o motor na faixa de carga crítica

(40 a 60% da carga nominal) contra aquecimento exagerado, evitando o excesso de corrente que pode provocar temperaturas danosas ao isolamento.

Os motores, em geral, têm a corrente de arranque superior à normal. O relé térmico possui um período de aquecimento inerente que o torna capacitado para um excesso momentâneo de corrente durante a partida e o tempo de aceleração do motor, mas não para a proteção contra curto-circuito, isto é, o relé térmico protege o motor contra sobrecargas e não o faz contra curto-circuitos.

Geralmente os dispositivos que efetuam a proteção contra sobreaquecimento do estator, também protegem, indiretamente, o motor contra o sobreaquecimento de seu rotor.

A fig. 140, ilustra a curva característica do relé térmico. Essa curva mostra o tempo de abertura "Temp. abertura" do relé, partindo-se do relé frio e aplicando-se carga tripolar "Is".

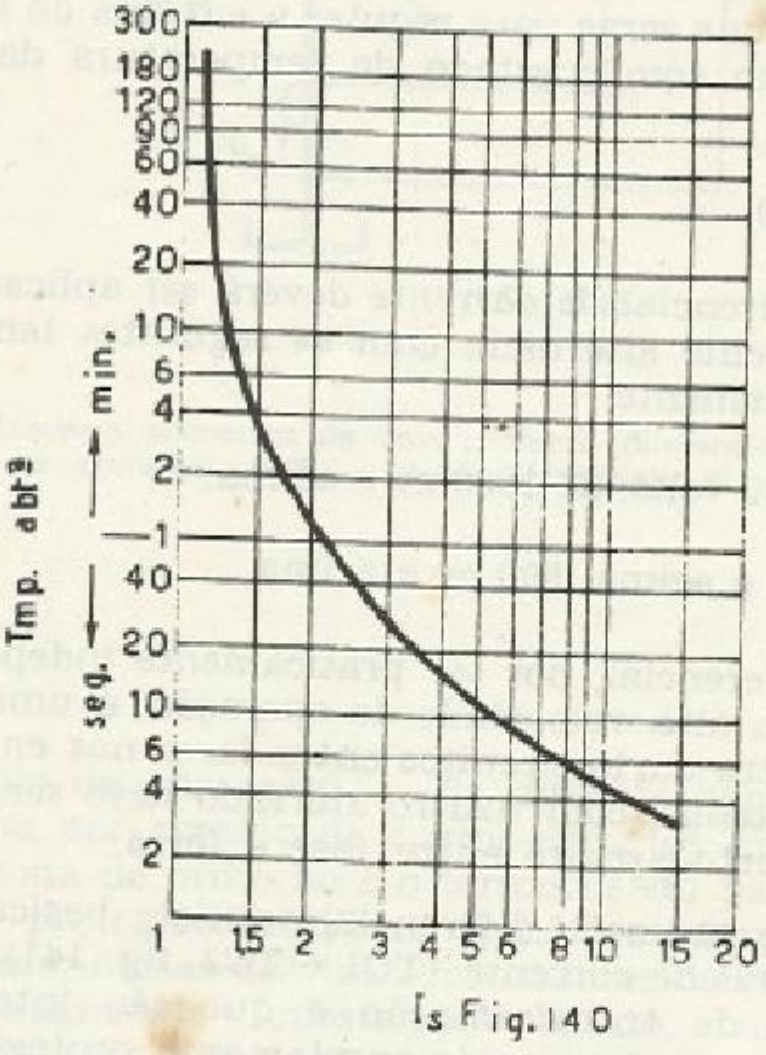


Fig. 140 — Curva característica dos relés térmicos. A curva mostra o tempo de abertura do relé, partindo-se do relé frio. Temp abtª — tempo de abertura. Is — corrente ajustada.

Proteção contra Superaquecimento do Estator.

Esta proteção é obtida através de um relé, operando em conjunto com detectores de temperatura introduzidos nas ranhuras junto com o enrolamento do estator do motor. A medida direta da temperatura do enrolamento pode ser controlada por um simples aparelho de medida.

Os relés de temperatura não são construídos, fundamentalmente, para proteção contra avarias que possam ser causadas em uma máquina por curto-circuito. Eles são instalados, exclusivamente, para proteção contra o superaquecimento de toda a máquina, o que ocorre gradualmente e sem localização fixa.

Os relés de temperatura em instalações isoladas devem, automaticamente, reduzir a carga da máquina ou parar a unidade quando opere o relé, mas em instalações guarnecidas, normalmente, eles dão, simplesmente, um alarme como indicação.

Em determinados motores é, usualmente, empregado um manostato para controlar a entrada do ar de refrigeração. O manostato é um aparelho que serve para regular a entrada do ar de arrefecimento, de acordo com o estado de temperatura da máquina controlada.

Proteção diferencial.

A proteção diferencial de corrente deverá ser aplicada a todos os motores de corrente alternada com as seguintes tensões e potências, aproximadamente:

a) 2200 a 6000 volts, de 1500 cv e acima;

b) 6000 volts e acima, 500 cv e acima.

A proteção diferencial, por ser praticamente independente da carga devido à sua alta velocidade de operação, é uma das mais recomendadas contra curto-circuitos entre fases nos enrolamentos do estator. Nos sistemas com neutro aterrado deve ser incluída a proteção contra curto-circuito entre fase e terra.

O esquema de proteção diferencial consiste basicamente em dois transformadores de corrente (TC1 e TC2, fig. 141), possuindo idênticas relações de transformação e que são interpostos no circuito em ambos os extremos do enrolamento protegido, comparando as corrente que entram e saem do bobinamento. O transformadores de corrente são interligados para uma fase, como ilustra a fig. 141, sendo igual para as outras duas fases. O relé diferencial "R" é ligado aos condutores que interligam os transformadores de corrente.

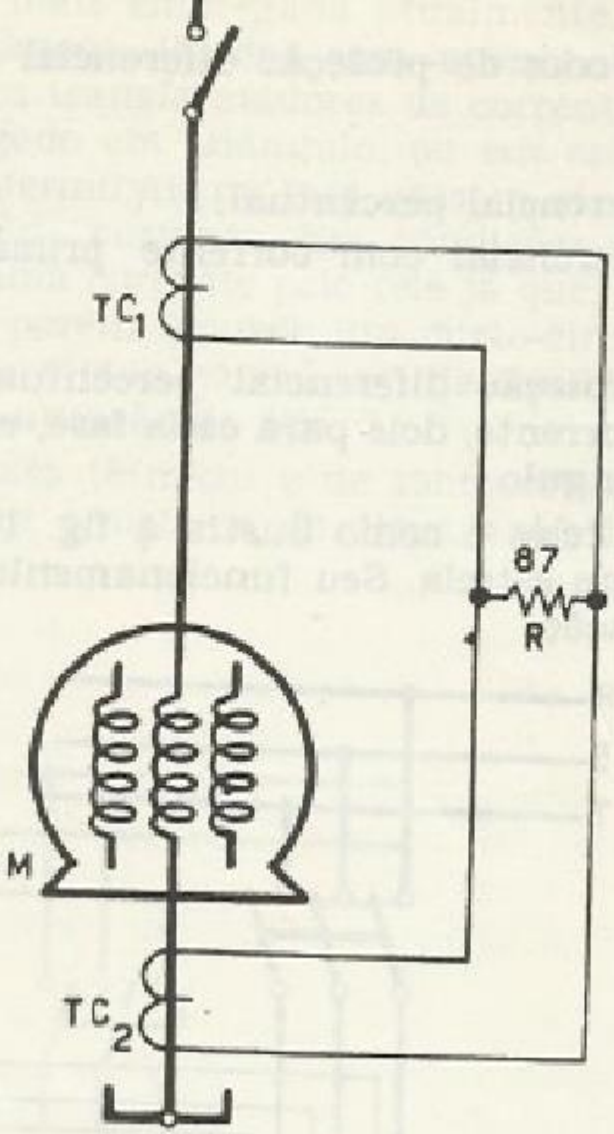


Fig.141

Fig. 141 — Esquema elementar de uma proteção diferencial. TC — transformador de corrente. 87,R — relé diferencial. M — motor.

Princípio de operação. — Se durante condições normais de operação, ou por ocasião de curtos-circuitos externos da zona de proteção (zona de proteção é o termo usado para denotar a seção do circuito protegido, entre os transformadores de corrente) as correntes secundárias dos transformadores de corrente (TC) serão iguais em magnitude e opostas em sentido, e não fluirá nenhuma corrente na bobina de operação do relé diferencial.

Quando ocorrer um curto-circuito dentro da zona de proteção abrangida pelos transformadores de corrente haverá um desbalanceamento das correntes acima mencionadas e a sua diferença fluirá através da bobina de operação do relé, motivando seu funcionamento.

Metodos de proteção diferencial.

Existem dois métodos de proteção diferencial de motores elétricos:

a) Proteção diferencial percentual;

b) Proteção diferencial com corrente primária autobalanceada.

O método de proteção diferencial percentual emprega seis transformadores de corrente, dois para cada fase, em motores ligados em estrela ou triângulo.

A ligação destes relés é como ilustra a fig. 142, para o caso dos motores ligados em estrela. Seu funcionamento já foi descrito no princípio de operação.

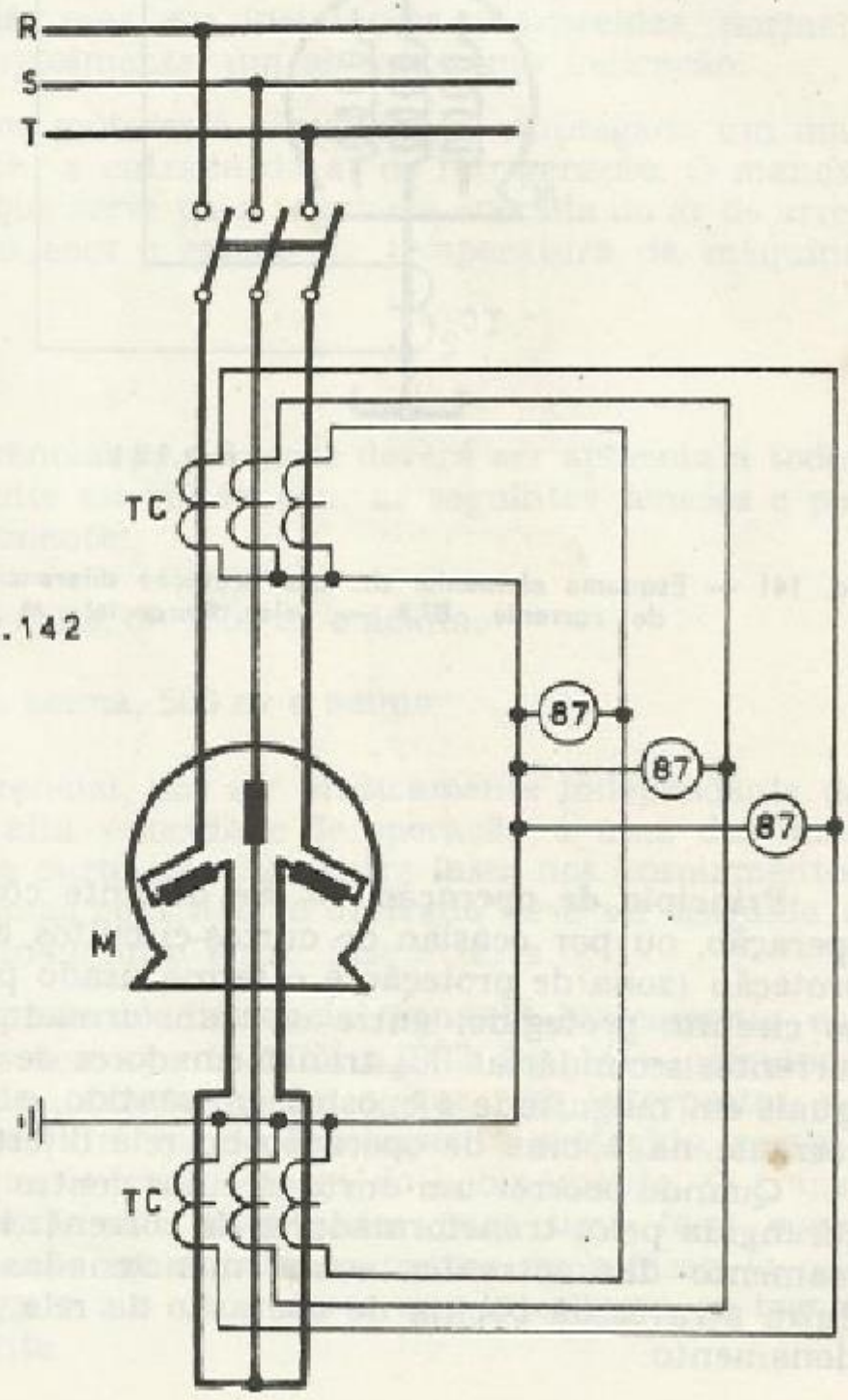


Fig.142

Fig. 142 — Diagrama de uma proteção diferencial. 87 — relé diferencial. TC — transformador de corrente. M — motor.

balanceada é a mais empregada atualmente. Usa relés de sobrecorrente instantâneos, ligados com apenas três transformadores de corrente. Estes transformadores de corrente são do tipo janela. Se o motor é ligado em triângulo, ou em estrela como mostra a fig. 143, os dois terminais da fase passam através de cada um dos transformadores de corrente. Em condições normais de operação não passa nenhuma corrente pelo relé já que, em cada fase, elas se balanceiam. Se, porém, houver um curto-circuito nos enrolamentos do estator do motor haverá um desequilíbrio dessas correntes que originarão a atuação do relé.

Igual aos relés térmicos e de sobrecorrente, os relés diferenciais atuam sobre o sistema de disparo do disjuntor.

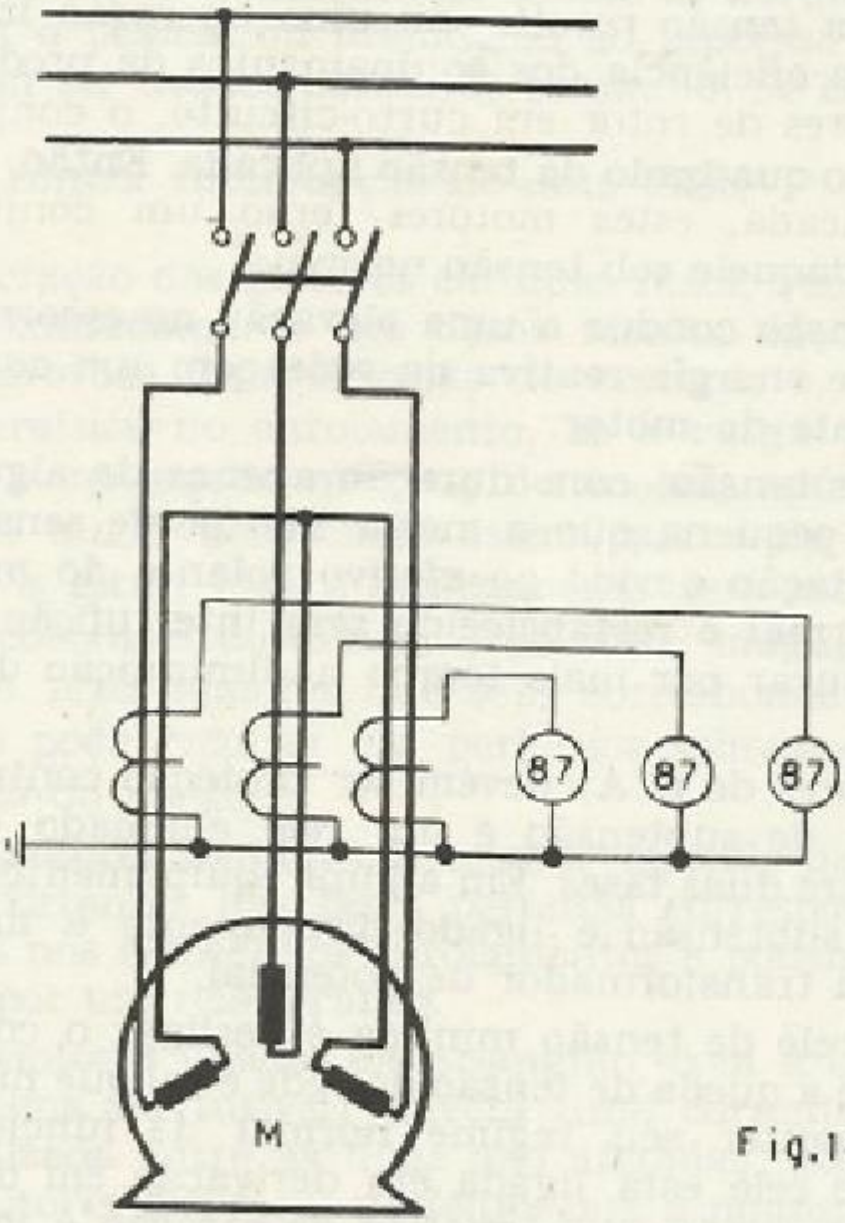


Fig.143

Fig. 143 — Diagrama de uma proteção diferencial autobalanceada. 87 — relé diferencial. M — motor.

Proteção contra subtensão.

As subtensões são quedas nas tensões nominais fornecidas pela concessionária de energia ou pelo sistema de geração próprio da indústria.

Qualquer defeito na linha de alimentação que ocasione um abaixamento de tensão é perigoso para o motor. Como a intensidade da corrente varia inversamente com a tensão, se esta diminui, a corrente necessária será muito maior, provocando um aquecimento grande em curto espaço de tempo. A baixa tensão na rede é responsável também pela perda de potência dos motores, que como conseqüência, sofrem um esquentamento muito grande.

Todos os motores são garantidos para fornecer sua potência de placa sob condições de 10% acima ou 10% abaixo da tensão especificada, porém não necessariamente dentro do acréscimo de temperatura previsto. Em outras palavras, eles fornecerão sua potência total dentro de uma temperatura segura. Entretanto, uma diminuição na tensão resulta em uma operação insatisfatória e diminuição da eficiência dos equipamentos da produção. Por exemplo, nos motores de rotor em curto-circuito, o conjugado de partida varia com o quadrado da tensão aplicada. Então, com 90 % da tensão especificada, estes motores terão um conjugado de arranque de 81% daquele sob tensão normal.

A queda de tensão conduz a uma elevação no escorregamento e o motor consume energia reativa da rede com um conseqüente aumento da corrente do motor.

Uma queda de tensão, com duração apenas de alguns ciclos da corrente, é tão pequena que o motor não perde sensivelmente o momento de rotação devido ao efetivo volante do motor, e o funcionamento normal é restabelecido sem interrupção. No caso da baixa tensão durar por mais tempo a diminuição de marcha torna-se elevada.

Todos os motores de C.A. devem ter proteção contra subtensão. O dispositivo de subtensão é um relé chamado de tensão mínima, ligado entre duas fases. Em alguns equipamentos de baixa tensão, o relé de subtensão é ligado diretamente à linha e em outros é usado um transformador de potencial.

A função do relé de tensão mínima é desligar o contator ou o disjuntor quando a queda de tensão da rede é tal que não permite mais ao motor manter seu regime normal de funcionamento. Como a bobina do relé está ligada em derivação em duas fases, quando cai a tensão, a força magnética de atração é insuficiente para se opor à mecânica, o relé opera, e efetua o comando de desligamento da chave.

No caso de motores de 600 volts e abaixo, controlados por contatores mantidos fechados magneticamente, uma queda de tensão age neste caso sobre os contatores, de forma idêntica àque-

la sobre os relés instantâneos ajustados para a tensão mínima. A abertura por baixa tensão é automaticamente realizada pelo contator quando falta a tensão ou esta cai a um valor predeterminado.

Normalmente a abertura destes contatores por subtensão é apenas temporária. Se eles são alimentados de forma fixa (botão de comando do tipo constante) quando o motor está em marcha, o contator imediatamente religará no momento do restabelecimento da tensão, em instalações que não admitam interrupções durante o funcionamento como por exemplo: indústrias químicas, onde a parada levaria a perda dos materiais; instalações automatizadas, onde uma interrupção prejudicaria toda a produção; fábricas de plástico cuja parada teria conseqüências dispendiosas; instalações de refrigeração onde paradas causariam danos aos produtos, etc.

Quando se deseja uma parada definitiva (como no caso por exemplo de máquinas-ferramenta, em que uma religação automática quando as condições de tensão se normalizarem, será perigoso para o pessoal ou prejudicial ao processo ou ao equipamento), devem ser usados botões de comando, de contato automático.

Proteção contra Interrupção de uma Fase.

A operação dos motores em duas fases, que, normalmente, em 75% aproximadamente dos casos resulta da queima de um dos fusíveis, provoca uma elevação de corrente e, conseqüentemente, da temperatura no enrolamento, se a carga permanecer inalterada. Se o conjugado máximo do motor, após a interrupção de uma fase, ainda permanece maior que o de trabalho, o motor continua a girar, mas o deslizamento será mais elevado, adquirindo as correntes do estator e do rotor magnitudes aproximadamente 1,6 vezes maiores que seus correspondentes valores nominais. Isto pode resultar em perigosos sobreaquecimentos para o isolamento do motor.

Em motores ligados em estrela, quando da abertura de uma fase, as correntes nas fases perfeitas correspondem às correntes existentes nos respectivos enrolamentos e podem ser, portanto, detectadas por um relé térmico.

Nos motores ligados em triângulo, com a interrupção de uma fase (queima do fusível) haverá uma corrente mais elevada na fase localizada entre as duas não afetadas, desde que a corrente nos condutores das fases perfeitas seja a nominal. Se o motor não estiver dotado de um sistema de medição direta da temperatura no enrolamento, será necessário, portanto, prever uma proteção contra interrupção de fase. Esta proteção é, usualmente, feita por um relé de seqüência de fases que opera baseado na dissimetria entre as três correntes de fase.

Proteção contra Reversão de Fase.

O rotor dos motores de C.A. sobreaquecer-se-ão no caso de um desequilíbrio de fase ou na eventualidade de operação monofásica. No caso de motores pequenos e médios a proteção é dada pelos relés térmicos, como estes relés são relativamente lentos, o preço dos motores maiores justifica uma proteção maior. Deve ser acrescentado um relé de equilíbrio de corrente ou de seqüência de fase reversa.

O relé protege o motor contra partida na direção de rotação invertida e impede possíveis danos mecânicos ao equipamento acionado. Protege também o rotor contra sobreaquecimento devido à corrente de seqüência negativa induzida no rotor, causadas por correntes muito desequilibradas no estator.

Este relé tem dois elementos monofásicos com bobinas em ligação cruzada, fig. 144, proteção "c". Opera para evitar a energização do motor protegido, na reversão da seqüência de fase, ou sempre que a diferença entre as correntes de duas fases quaisquer exceder um limite preestabelecido.

Proteção contra Inversão de Energia

A proteção direcional de potência é para evitar a contribuição de energia do motor para a rede. É feita por um relé que funciona em um valor desejável do fluxo de energia em uma dada direção, isto é, só permite a passagem da corrente num sentido.

O relé opera e desconecta o motor quando a corrente da linha tem um sentido prefixado.

Proteção contra Subvelocidade

A proteção de subvelocidade é feita por um relé que opera quando a freqüência está abaixo do normal. A sua finalidade é proteger grandes capacitores síncronos e motores de indução, particularmente em instalações isoladas contra danos que ocorreriam na reenergização fora de fase, ao ser religado automaticamente o disjuntor de energia da concessionária.

Proteção contra Perda de Sincronismo

Para todos os motores síncronos e conversores da freqüência é recomendável a aplicação de uma proteção ou relé contra perda de sincronismo. Quando a proteção opera deve abrir a chave de campo e o contator ou disjuntor de linha no instante em que o motor sai de sincronismo. Este relé é empregado também nos conversores de freqüência usados na interligação de dois sistemas, protegendo a máquina síncrona contra a perda de sincronismo.

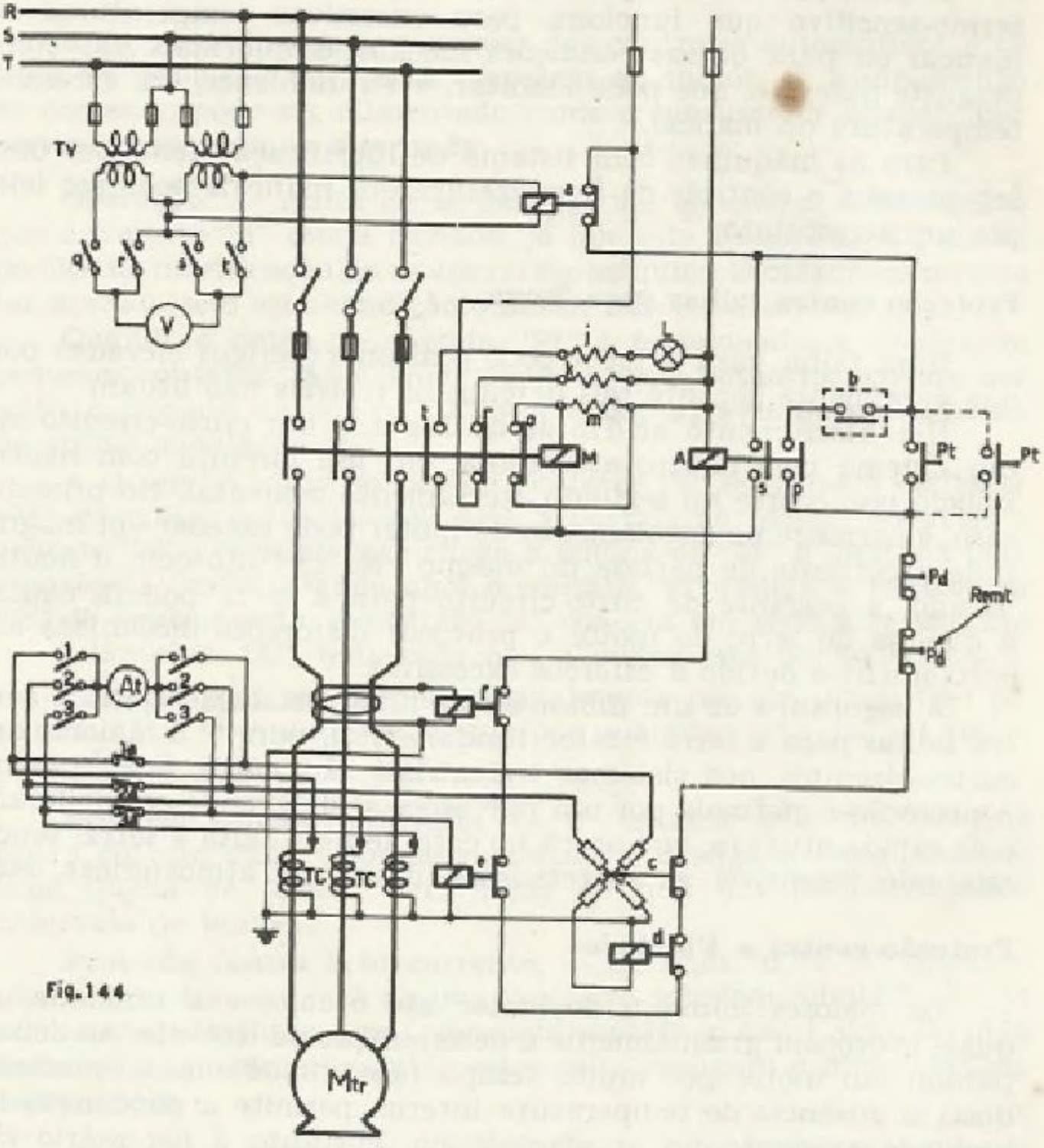


Fig. 144

Fig. 144 — Proteções de um motor trifásico.

Proteção contra Sobreaquecimento dos Mancais

A proteção de temperatura dos mancais é recomendada para todas as máquinas em instalações isoladas. Existem exceções nas quais as máquinas são tão pequenas, ou são de um tal modelo que não justifica a adição desta proteção.

A proteção é feita por meio de um relé com um elemento termo-sensitivo que funciona para excessivas temperaturas do mancal ou para outras condições mecânicas anormais, tal como desgaste indevido, que pode resultar, eventualmente, em excessiva temperatura do mancal.

Para as máquinas com sistema de lubrificação feito por óleo, sob pressão, o controle da temperatura dos mancais pode ser feito por um termostato.

Proteção contra falhas para Terra

Uma falha para a terra pode ocasionar perigos elevados porque geralmente perante tais defeitos os fusíveis não atuam.

Um aterramento acidental dá lugar a um curto-circuito em um sistema com neutro aterrado e, em um circuito com neutro isolado isso ocorre no segundo aterramento acidental. No primeiro caso, a corrente no enrolamento do motor pode exceder em magnitude a corrente de partida do mesmo. No circuito com o neutro isolado, a corrente de curto-circuito para a terra poderá causar a queima do ferro do motor e provocar distorções mecânicas aos enrolamentos devido a esforços excessivos.

A segurança de um motor ou de uma instalação elétrica contra falhas para a terra é fator fundamental, porque a maioria dos curtos-circuitos nos sistemas industriais são entre fase e terra. A proteção é efetuada por um relé especial de grande sensibilidade e de rápida atuação, que opera no caso de uma falta à terra, sendo este relé insensível as sobretensões, descargas atmosféricas, etc.

Proteção contra a Umidade

Os maiores inimigos do motor são o calor e a umidade, os quais provocam gradualmente a deterioração do isolante. Ao deixar parado um motor por muito tempo (aproximadamente quarenta dias) a ausência de temperatura interna permite a condensão da umidade existente no ar atmosférico. Portanto é necessário eliminar esta umidade antes que penetre no motor, criando condições para baixo isolamento e provocar danos à isolação.

Dependendo do tamanho e importância do motor é conveniente dispor-se de uma resistência de aquecimento instalada internamente ou o mais próxima possível do motor, que é ligada automaticamente quando o motor é desligado da rede, "k" da fig. 144. Esta resistência tem por fim evitar que o motor perca o isolamento por penetração da umidade em seus isolamentos.

MÉTODO DE OPERAÇAO DE UM MOTOR DE CORRENTE ALTERNADA

Há certos consumidores que alimentam com corrente contínua o equipamento de comando de seus motores para protegê-los das repercursões de quedas de tensão durante o arranque, e das eventuais perturbações passageiras do sistema.

A fig. 144 ilustra as conexões dos controles automáticos e os tipos de proteção que estes oferecem ao motor. O equipamento de comando pode ser alimentado como o consumidor desejar, por corrente contínua ou alternada.

Operação. — Antes de se dar partida ao motor, é necessário que o contato "b" esteja fechado, já que este fechará se a pressão do óleo de lubrificação do motor ou da máquina acoplada ao mesmo for normal, sem esta condição o motor não partirá.

Quando o botão de partida "Pt" é pressionado, a bobina do pequeno contator "A" é energizada. Após o botão de partida ser solto, o circuito da bobina "A" é mantido através de seu contato de auto-alimentação "p".

A chave "A" através de seu contator "s" energiza o contator "M" de maior potência, que dará a partida ao motor. Ao abrir o contato "o" a corrente que chega a bobina de "M" é limitada pela resistência "m". Quando abre o contato "r" desliga a resistência "k" de aquecimento. O contato "t" conecta em série a resistência " " à lâmpada "L", indicando que o motor está ligado.

O motor pode ser parado manualmente por um dos botões de parada "Pd" ou automaticamente por qualquer uma das seguintes proteções:

Proteção contra Subtensão. — É realizada pelo relé "a" que opera em um dado valor de subtensão e desliga o motor quando uma queda de tensão dura mais do que um predeterminado intervalo de tempo.

Proteção contra Sobrecorrente. — Os relés "d" e "e" desenergizam o motor em caso de um excessivo sobreaquecimento ou, se a corrente aumentar com demasiada rapidez, o que é sinal de uma falha ou curto-circuito, então estes relés desligam o motor instantaneamente.

Proteção contra Falhas para Terra. — É realizada pelo relé de sobrecorrente de terra, ligado a um transformador de corrente tipo anel que envolve os condutores das três fases. É de grande sensibilidade e extrema rapidez. Opera nas falhas para a terra, reduzindo ao mínimo a danificação do motor.

Proteção contra Reversão de Fase. — O relé "c" opera quando há uma inversão de fases, um desequilíbrio de corrente ou no caso da interrupção de uma fase.

tem permanentemente ligada através do contato "r" uma resistência "k" de aquecimento contra a umidade.

Medição da Tensão e da Corrente. — O voltímetro "V" é para a medida da tensão entre fases. Está ligado ao secundário de um transformador de potencial "TV" para reduzir as tensões elevadas aos valores de 110 volts, que são adequados para alimentação de instrumentos e relés. A ligação deste transformador está representado no esquema, e o enrolamento primário de alta tensão é ligado em paralelo com as fases R, S, T.

Com a chave comutadora na posição q — s estaremos lendo a tensão entre as fases S e T; na posição q — t a tensão entre R e T e finalmente na posição r — t a tensão entre R S.

O amperímetro "At" é usado para a medição da corrente em cada uma das fases do motor. É ligado aos secundários dos transformadores de corrente "TC" que têm o enrolamento primário ligado em série com a fonte (o próprio condutor da fonte é o enrolamento primário do transformador), e o secundário tem como carga os relés de proteção. Os transformadores de corrente têm por finalidade reduzir a corrente circulante que passa pelo primário para um valor secundário suficientemente baixo, para permitir uma medição favorável. A corrente secundária não deve ultrapassar com carga plena 5A. O esquema de ligações está representado no diagrama do motor.

A chave na posição de aberto o contato "1.ª" e fechados os contatos "1", permite a leitura de corrente na fase "R"; na posição "2.ª" aberto e "2" fechados, a leitura na fase "S" e finalmente, os contatos "3" fechados e "3.ª" aberto, a medida de corrente na fase "T".

Os transformadores de corrente em serviço nunca devem ter o secundário aberto, sem terem ligados os relés ou instrumentos de medição, pois senão a f.m.m. da corrente no primário ficará sem oposição e irão ocorrer altas induções magnéticas no núcleo (aquecendo-se demasiadamente) que o levará a saturação, resultando tensões elevadas nos bornes secundários. Quando a carga do secundário deve ser desligada, ligam-se primeiramente em curto-circuito os bornes do enrolamentos secundário do transformador de corrente. A ligação em curto-circuito só deverá ser desfeita depois de estar ligada a carga.

A fig. 144 ilustra o esquema completo de funcionamento do motor e a fig. 145 mostra apenas o circuito de comando esquematizado em estilo americano.

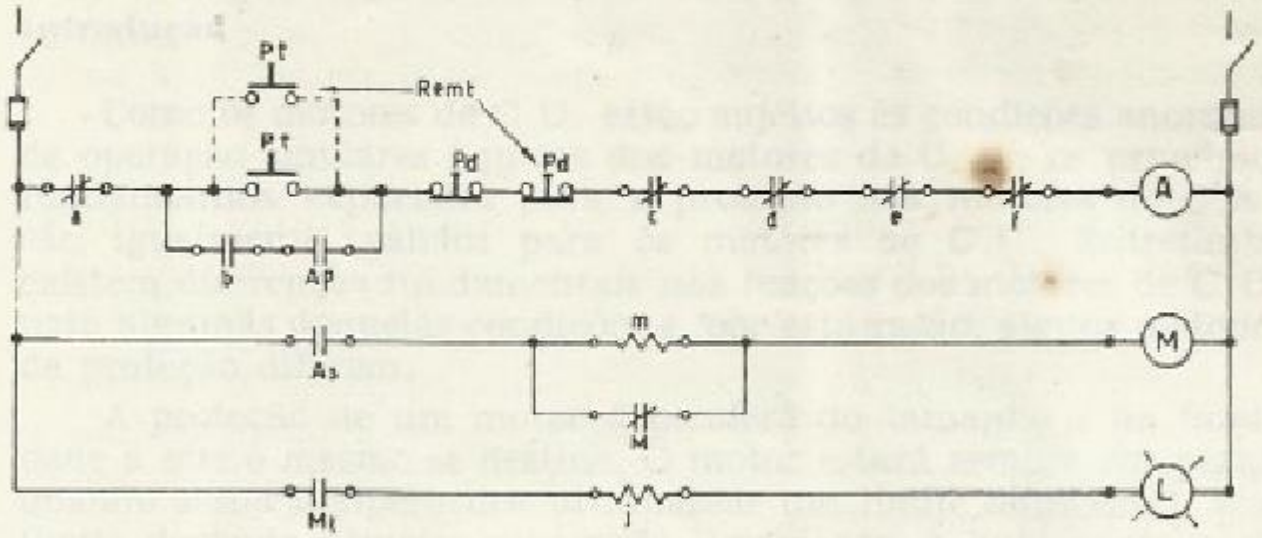


Fig.145

Fig. 145 — Diagrama estilo americano do circuito de comando da fig. 144.

A chave magnética (contator) de corrente alternada é algo diferente da chave magnética de corrente contínua, porque em corrente alternada, intervêm fenômenos como a indutância e as perdas por histerese ou correntes de Foucault, que na corrente contínua se apresentam de modo diferente.

A "chave de corrente alternada" requer apreciável corrente para vencer a força da mola e ser fechada porque a relutância é grande. Uma vez fechada a chave a relutância da mesma diminui consideravelmente e já não mais é necessária a mesma corrente para mantê-la fechada, embora a força da mola seja aproximadamente a mesma. A corrente se reduz automaticamente, porque ao se fechar o circuito magnético, simultaneamente aumenta a indutância da bobina e conseqüentemente a sua reatância indutiva.

Na "chave de corrente contínua" não sucedem os fatos descritos acima, porque a indutância não tem influência sobre a corrente estacionária, por isso, torna-se necessário ao se fechar a chave magnética colocar no circuito uma resistência que limite a corrente ao mínimo necessário.

Capítulo 23

PROTEÇÃO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Introdução

Como os motores de C.C. estão sujeitos às condições anormais de operação similares àquelas dos motores de C.A., os princípios fundamentais explicados para a proteção dos motores de C.A., são, igualmente, válidos para os motores de C.C. Entretanto, existem diferenças fundamentais nas reações dos motores de C.C. para algumas daquelas condições e, por esta razão, alguns métodos de proteção diferem.

A proteção de um motor dependerá do tamanho e da finalidade a que o mesmo se destine. O motor estará sempre em perigo quando a sua temperatura ultrapassar um limite admissível. Esse limite depende principalmente do isolamento, o qual perde parte de sua resistência mecânica e elétrica quando submetido a solicitações excessivas de temperatura, podendo assim, causar severas perturbações.

Os motores de C.C. usualmente possuem proteções para as condições seguintes: curto-circuito, sobrecarga, sobrecorrente, superaquecimento, sobrevelocidade, reversão da polaridade, perda de excitação, falhas para a terra, sobreaquecimento dos mancais, descarga do campo magnético, etc.

Proteção contra curto-circuitos

As providências a tomar, em matéria de proteção contra curto-circuitos, são basicamente as mesmas que para os motores de corrente alternada.

Proteção contra sobrecarga e sobrecorrente

O sistema de proteção de sobrecorrente, com o propósito de desconectar o motor com carga excessiva ou para falhas internas, é recomendável em todos os casos.

Quando opera a proteção de sobrecarga atua sobre um dispositivo que faz abrir o disjuntor da linha de alimentação, parando o motor.

Proteção contra superaquecimento

Como o induzido de um motor de C.C. é o elemento crítico no que se refere ao aquecimento, não é possível sobrecarregá-lo tanto como ao de um motor trifásico de C.A.

Detectores de temperatura são usualmente impraticáveis para os motores de C.C., porque seu induzido é rotativo. Usualmente é empregado um relé de temperatura, tipo réplica, operando em paralelo com o induzido, ou um relé de temperatura como um detector sensitivo, colocado em contato direto no indùzido que permite uma proteção segura, porém é relativamente cara e tal proteção é justificável apenas em casos especiais. Também um relé termostático pode ser colocado na saída do ar de refrigeração do motor.

Proteção contra sobrevelocidade

A proteção de sobrevelocidade consiste em um dispositivo mecânico-centrífugo, de ação direta, instalado no eixo da máquina. A sobrevelocidade pode ser causada por condições anormais de operação, falha do campo, baixo campo de excitação, etc. O dispositivo de sobrevelocidade pode operar por conexão direta mecânica ou elétrica; abrindo o disjuntor do motor impedindo um aumento indesejável de sua velocidade. Esta proteção deve ser provida em todos os casos, exceto para máquinas tão pequenas que tal proteção não se justifique.

Proteção contra reversão de polaridade

Quando os motores de C.C. em instalações isoladas operam em paralelo com outras fontes de energia, são providos com um relé direcional de voltagem para evitar a ligação do motor ao barramento com polaridade indevida. Este relé é também recomendado para motores de C.C. em processos industriais, nas instalações guarnecidas, para as quais a polaridade deve ser correta.

Proteção contra perda de excitação

Esta proteção é recomendada para todos os conversores de freqüência, motores síncronos, geradores, etc., é feita por um relé que oferece as seguintes vantagens: evitar o sobreaquecimento do estator devido a corrente de alta pulsação que o motor solicitaria da rede enquanto tentasse acionar a carga sem excitação de campo. Impede o sobreaquecimento do rotor se o motor continuasse a funcionar como motor de indução, isto é, sem excitação, etc.

Para esta proteção, normalmente, é empregado um relé do tipo "mho" deslocado, um relé de subtensão ou um relé de subcorrente de campo. O relé tipo "mho", quando usado, deve ser ajustado para reconhecer a condição de redução proposital de excitação e, só atuará, no caso de perda acidental de excitação.

Proteção contra falhas para a terra

O circuito elétrico dos motores de C.C. é, usualmente, não ligado à terra. O aparecimento de uma falha á terra num ponto do sistema pode ser controlado por um voltímetro.

Embora uma falha para terra não ocasione nenhum prejuízo inicial ao motor ou excitatriz de um motor síncrono, gerador, etc., recomenda-se que esta seja detectada. O aparecimento de uma segunda falha não pode ser tolerada, porque parte do circuito do campo fica passando à terra e há um aumento de corrente na parte restante. Em máquinas acima de 250 V e 500 kW aproximadamente, é prática instalar um relé de proteção de aterramento. Uma falha para terra no motor permitirá que circule corrente na bobina do relé e este operará.

Para carregadores de bateriais e motores de pequena potência o esquema da fig. 146, mostra como poder-se-ão protegê-los contra uma falha para terra. Empregam-se duas lâmpadas (L_1 e L_2) ligadas em série entre as fases da linha, sendo aterradas em seu ponto central. Em condições normais de serviço, as lâmpadas luzem com a metade de seu brilho. No caso de um aterramento em uma das fases, a lâmpada correspondente se apagará e a outra luzirá com pleno brilho. Quando uma das lâmpadas se funde a outra se apaga.

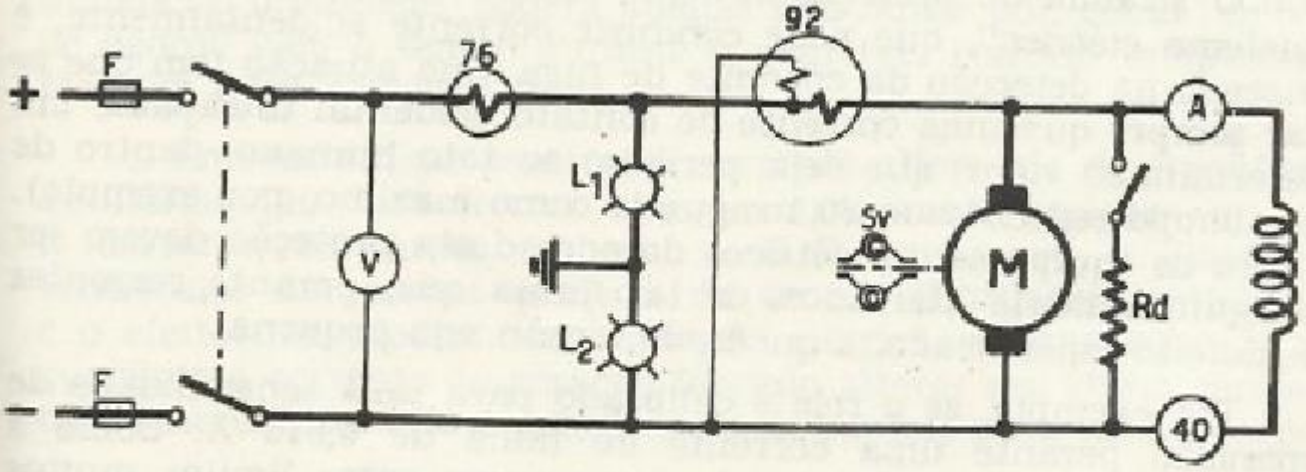


Fig. 146

Fig. 146 — Proteção de um motor de C.C. F — fusível. V — voltímetro. A — amperímetro. 76 — relé de sobrecorrente. L_1, L_2 — indicação de falhas para a terra. 92 — relé de reversão de polaridade. Sv — dispositivo de sobrevelocidade. Rd — resistência para descarga do campo magnético. 40 — relé de perda de excitação. M — motor.

Proteção contra sobreaquecimento dos mancais

Quando desejado, pode-se proteger os mancais dos motores de C.C. contra sobreaquecimento, mediante um relé equipado com um dispositivo sensistivo à temperatura, colocado em contato direto com o metal dos mancais.

Descarga do campo magnético

O processo de descarga do campo magnético consiste no desligamento do motor e na dissipação da energia do campo, armazenada no enrolamento. Isto é conseguido pela comutação do enrolamento do campo através de uma resistência de descarga, para evitar o aparecimento de sobretensões perigosas. Cada vez que se abre o disjuntor do motor, a resistência de descarga do campo liga.

O diagrama da fig. 146, ilustra as proteções de um motor de C.C.: F fusível; V voltímetro; A amperímetro; 76 relé de sobrecorrente; L_1 e L_2 indicação de falhas para a terra; 92 relé de reversão de polaridade; Sv dispositivo de sobrevelocidade; Rd resistência para descarga do campo magnético; 40 relé de perda de excitação e M motor.

PROTEÇAO CONTRA CONTATO ACIDENTAL

A proteção de todo motor, instalação ou equipamento elétrico deve-se manter entre limites não perigosos a corrente de contato, a fim de garantir a proteção de pessoas contra possível contato manual.

O sistema de proteção contra o contato causal em parte do "sistema elétrico", que pode conduzir corrente acidentalmente, é baseado na detecção da corrente de fuga. Sua atuação tem que se dar sempre que uma corrente de contato acidental ultrapasse um determinado valor, que seja perigoso ao tato humano, dentro de um tempo especificado (0,1 segundo como máximo, por exemplo). Todos os equipamento elétricos dotados desta proteção devem ser obrigatoriamente aterrados, de tal forma que, perante correntes de defeito especificado, a queda de tensão seja pequena.

Por exemplo, se o relé é calibrado para uma sensibilidade de operação perante uma corrente de falha de 0,015 A. Como a resistência ôhmica do corpo humano varia entre limites muitos amplos, aproximadamente desde 5.000 até 60.000 ohms, embora, em determinados casos, quando as circunstâncias são muito desfavoráveis, possa diminuir até 200... 500 ohms. Para os cálculos admite-se uma resistência de 2.000 ohms, então resulta que a tensão de contato limite será de:

$$V = R \cdot I = 2000 \cdot 0{,}015 = 30 \text{ volts}$$

A resistência de aterramento do setor protegido não deve ser superior a:

$$R = \frac{30}{I_1}$$

onde I_1, é a corrente limite do defeito ou contato, que é a corrente que faz à proteção atuar.

Quando a proteção atua deve desligar todo o sistema, inclusive o condutor neutro, caso este exista.

As condições técnicas que devem ser satisfeitas por este tipo de proteção são fixadas em norma.

Os efeitos da perturbação produzida pelo choque elétrico variam e dependem de determinada circunstâncias, como por exemplo: a) Percurso da corrente no corpo humano; b) tempo de duração desta corrente no corpo; c) intensidade da corrente; d) freqüência e natureza da corrente elétrica; e) condições orgânicas da pessoa, etc.

Normalmente, o limite entre baixa e alta tensão é o valor de 600 a 1000 volts.

Até a tensão de 42 volts não são previstas medidas de proteção. Acima deste valor são válidas as prescrições de proteção contra contato acidental.

Para brinquedos é recomendado o emprego de tensões não superiores a 24 V. Apesar de não apresentar um valor muito elevado, quando uma criança com os dedos úmidos encosta nos terminais do brinquedo, poderá apenas não sentir dor, como também de acordo com o tempo durante o qual este contato se mantém, resultar num acidente fatal.

O homem é mais sensível à corrente alternada de freqüência industrial (40...60 Hertz) que é muito mais perigosa do que a corrente contínua, embora a C.C. provoque a fibrilação ventricular em menor período de tempo (fibrilação ventricular é o efeito que produz uma corrente elétrica externa sobre a pequeníssima corrente do coração fazendo alterar seu rítmo cardíaco ou a sincronização do bombeamento de sangue para todo o corpo).

À medida que a freqüência aumenta, os efeitos de sensação da corrente alternada diminuem. Uma pessoa que suporta 15 miliampères a 10.000 Hertz, poderá suportar 200 mA a 100.000 Hz.

A resistência ôhmica do corpo humano é muito variável, depende da posição ou contato do corpo com as partes energizadas do circuito e portanto do percurso oferecido à passagem da corrente, que poderá ou não atingir centros e órgãos de importância vital.

A sensibilidade humana ao choque elétrico é função da intensidade da corrente que atravessa o organismo e não da tensão do circuito.

São perigosas para as pessoas as correntes de mais de 10 miliampères; muito perigosas as de mais de 20 e mortais as acima de 60 miliampères.

A sensibilidade aos efeitos do choque elétrico nas mesmas circunstâncias é uma condição pessoal e varia de uma pessoa para outra, tendo grande importância a resistência total do corpo humano.

As perturbações orgânicas produzidas pela corrente alternada variam com a freqüência e são mais intensas para as de ordem das freqüências industriais.

É necessário obedecer cada vez com maior rigor e atenção as normas de proteção de sistemas elétricos, porque com a evolução e crescimento de aplicação da eletricidade, cada dia é maior o número de pessoas que correm perigo se falta proteção adequada nas instalações e equipamentos elétricos.

Capítulo 24

SISTEMAS DE ALARME

Introdução

Os sistemas de alarme são empregados freqüentemente tanto na indústria quanto em escritórios, residências, lojas comerciais, bancos, etc.

É possível controlar mediante um sistema de alarme praticamente todas as variáveis mensuráveis que intervêm em uma operação ou processo, bem seja este de natureza física ou química, como por exemplo:

a) Pressão, temperatura, mistura de gases, condutividade, cor, densidade, etc.;

b) Variação de voltagem, amperagem, freqüência, etc.;

c) Nível de sólidos, líquidos ou gases no interior de depósitos fechados, etc.;

d) Combustão, transformação de energia, etc.,

e) Movimento de máquinas dentro de limites pré-selecionados de velocidade ou de percurso, etc.

Um bom sistema de alarme deve ser: 1º) simples para operar com segurança e rapidez; 2º) independente da máquina ou equipamento que controla e que funcione por princípio diferente, para que as eventuais falhas de um não afetem o outro, etc.

O sinal de alarme deve ser claro e facilmente distinguível (isto é, não deve confundir-se com sons ou luzes semelhantes), indicando qual é o tipo de falha ou variável ocorrida.

O sistema de alarme, normalmente, deve ser projetado de modo que a indicação sonora e luminosa persistam até que o sinal seja desligado e identificado pelo operador. Desta maneira, a informação é também obtida para as variáveis e falhas que cessam antes que haja tempo de desligar o alarme e acionar o dispositivo de reconhecimento. Entretanto, determinadas instalações podem possuir certos relés mecânicos que operam por um breve período, sem que esteja ocorrendo nenhuma variação no momento; por exemplo, indicadores de fluxo para equipamentos de refrigeração de geradores ou transformadores. Sinais desnecessários de tais aparelhos podem ser evitados se o sistema de alarme é do tipo temporizado.

Um sistema de alarme pode empregar energia pneumática, hidráulica, mecânica ou elétrica para detectar a condição variável e assinalá-la. Geralmente o método mais empregado é o elétrico,

porque tais sistemas são mais simples de projetar, já que se pode empregar praticamente qualquer variável para provocar o acionamento de um relé.

Tipos de alarme

Existem três diferentes tipos principais de alarme, dependendo de como as indicações das variáveis são dispostas: com bandeirolas; com luzes permanentes ou com luzes intermitentes. Em todos os casos é essencial que a indicação da variável troque sua aparência quando o dispositivo de reconhecimento é acionado, de modo que seja possível distinguir entre falhas que tenham ocorrido no momento, e falhas já reconhecidas.

Dispositivos de sinalização

Indicação com bandeirolas. — O sistema de sinalização baseado em bandeirolas é um sistema muito simples. É empregado onde o número de pontos de sinalização é relativamente reduzido. É muito usado, por exemplo, na portaria dos hotéis, onde um quadro anunciador com plaquetas numeradas indica o local de chamada, às vezes conjugado com uma campainha. Embora a campainha possa ser desligada durante o dia, particularmente, durante o período noturno é importante que ela soe para chamar a atenção do porteiro, se eventualmente estiver adormecido, a fim de saber que está sendo feita uma chamada.

Indicação com luzes. — As luzes como dispositivo sinalizador podem ser empregadas em determinados processos, por exemplo: uma lâmpada que durante o funcionamento normal do processo ou da máquina permanece acesa, imediatamente alerta ao operador do equipamento em relação a uma variação ou parada da máquina, quando a lâmpada se apaga.

Indicação sonora. — O dispositivo de sinalização sonora é o melhor em se tratando de máquinas isoladas ou em áreas externas ao ar livre, para que o sinal seja audível a longa distância.

Sistemas de alarme duplos

Os sistemas mais complexos de alarme são os duplos, isto é, o sinal sonoro aliado ao sinal luminoso, que é, principalmente, adequado para uso nas salas de controle dos grandes centros industriais, onde se objetiva agrupar sinais de "variáveis" ou "falhas" de um grande número de equipamentos e processos. Estes sinais podem ser supervisionados num único e eficiente painel de alarme que avise ao pessoal da unidade que ocorreu alguma variação ou falha, e uma indicação mostrando qual o equipamento defeituoso ou a variável ocorrida.

Sempre que possível, o sistema de alarme deverá dar um sinal preventivo da condição insegura do processo, da máquina, etc.,

antes de interromper o funcionamento, mantendo assim ao mínimo as perdas de produção.

Todo sistema de alarme deve ser testado periodicamente, simulando as condições que o fazem atuar para saber se funciona bem e merece confiança.

Sistema de alarme em que cada ponto de sinalização exige apenas uma lâmpada

Cada ponto de sinalização exige um relé de sinal, seja de tipo instantâneo ou de tipo temporizado; em ambos os tipos duas variantes são disponíveis:

a) Os contatos fecham quando ocorre uma variável; o relé de sinal trabalha desenergizado;

b) Os contatos abrem-se quando ocorre qualquer falha ou variação, trabalhando o relé de sinal sempre energizado. Este tipo normalmente é empregado para os casos em que o contato emissor da variável se encontra instalado em locais afastados da instalação central. Assim sendo, caso seja interrompida a linha, falta de corrente, etc., como o relé de sinal trabalha energizado, automaticamente dará o aviso de que alguma anormalidade está acontecendo.

As lâmpadas estão montadas em painéis indicadores. Os relés de sinal, do pisca-pisca e da buzina podem ser montados em qualquer local desejado.

Operação. — As figs. 147 e 148, mostram o esquema do circuito. "S" representa o contato de sinal para o relé que se encontra montado numa instalação central. Este contato abre quando ocorre uma falha ou "variável", desenergizando o relé "A" de "I".

"S_1" é o contato emissor do sinal "variável" para o relé "A" de "II". Fecha e energiza o relé quando ocorre qualquer alteração na instalação.

Para melhor e mais rápida interpretação dos esquemas, vamos considerá-los em sua posição de trabalho, tal como se estivessem funcionando na prática, numa instalação qualquer.

Atuação do sinal da variável, voltando instantaneamente a sua normalidade. — Quando "S" abre ou "S_1" fecha, voltando-se a sua normalidade instantaneamente. Os relés de sinal através de seu contato "A_1", enviam um impulso aos relés "C" e "P", atuando estes instantaneamente e mantêm-se atuados através do contato de auto-alimentação "C_1", acendendo a lâmpada "L" apenas momentaneamente e permanentemente a cigarra "CI" que soa continuamente.

Parada do sinal sonoro. — O sinal sonoro é parado por meio do pulsador de parada "Silen", que ao interromper o circuito de "N" faz abrir o contato de auto-alimentação "C_1" do relé "C". Este pulsador pode ser colocado num ponto central do painel da sala de controle.

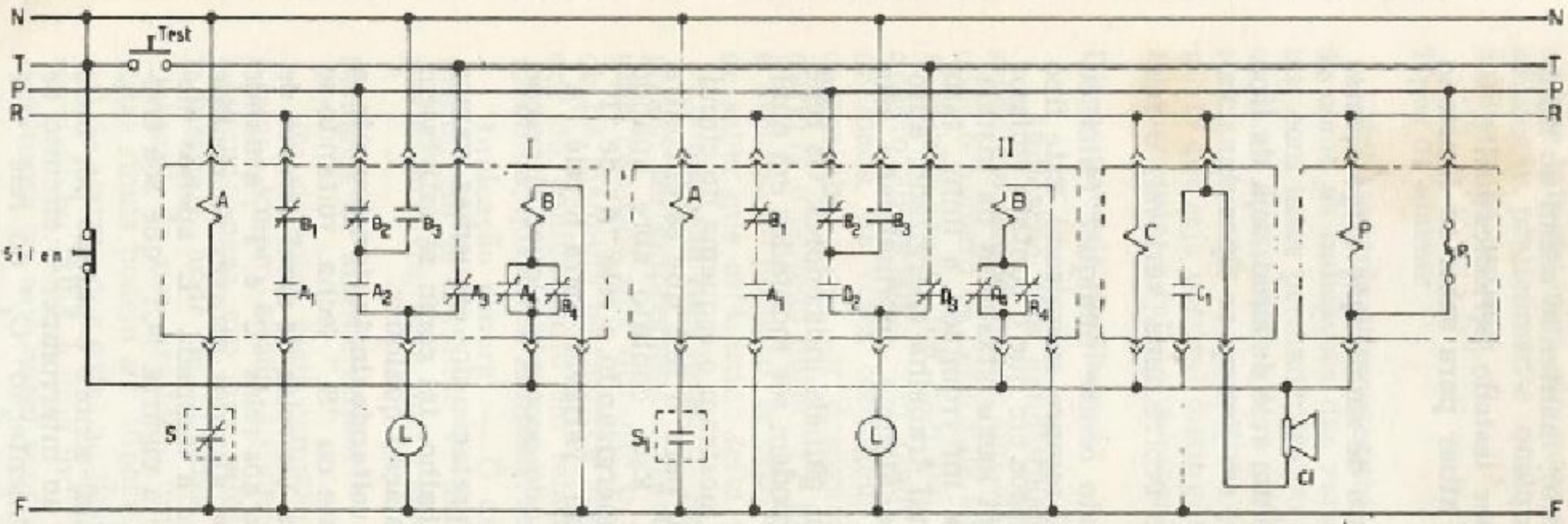


Fig. 147

Fig. 147 — Sistema de alarme com apenas uma lâmpada em cada ponto de sinalização. Estilo americano. conectores **ou dispositivo de acoplamento (operado mecanicamente).**

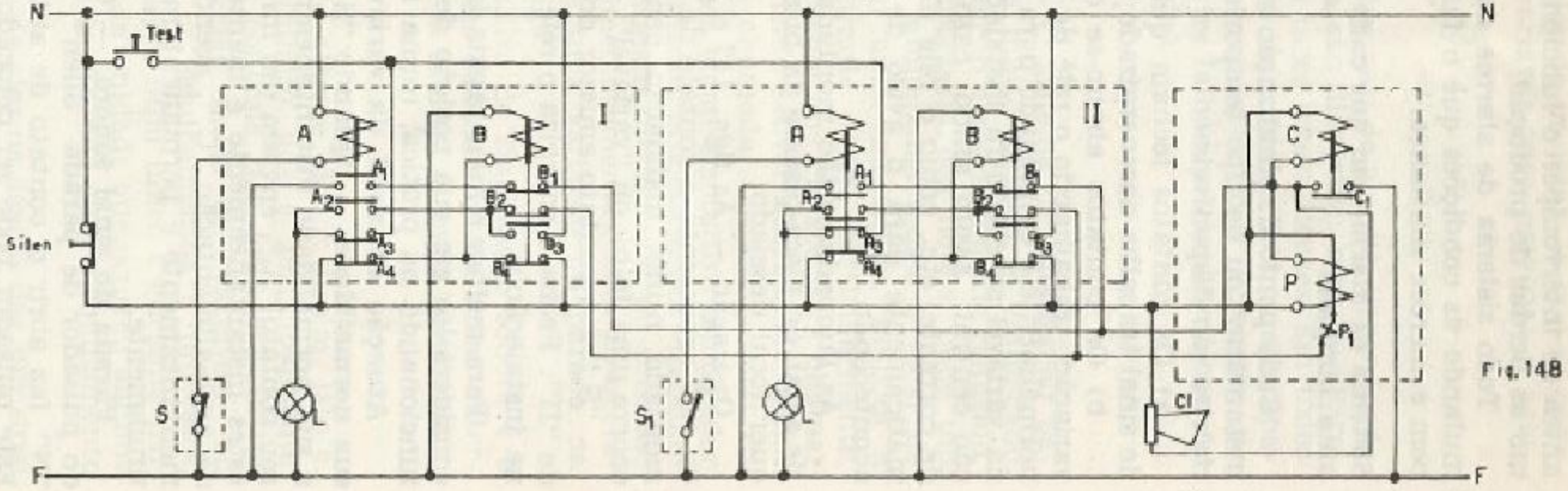


Fig. 148

Fig. 148 — O mesmo diagrama da fig. 147, em estilo europeu.

Indicação de falta ou variável. — Se "S" ou "S_1" permanecem indicando alguma alteração ocorrida na instalação, o relé de sinal "A" de "I" ou de "II" ficará atuado. Além do sinal sonoro, como já foi explicado anteriormente, acende a luz, intermitentemente, por meio do relé pisca-pisca "P" através do contato "P_1" que abre e fecha regularmente.

Cada vez que o pisca-pisca "P_1" fecha, a lâmpada "L" é ligada a linha "N" através dos contatos "B_2" e "A_2", e acende, porque o outro condutor ou linha "F" está ligado diretamente às lâmpadas. Quando o pisca-pisca "P_1" abre a lâmpada apaga. O sinal intermitente permanece até que a falha seja reconhecida; isto se a falha ou variável não houver desaparecido antes.

Reconhecimento. — A variável é reconhecida por meio do pulsador "Silen" que parará o sinal sonoro como já foi dito, e desenergizará o relé "B". Ao ser desenergizado, o relé "B" abre o contato "B_2" e fecha o contato "B_3", fazendo com que a lâmpada "L" permaneça emitindo uma luz contínua, enquanto a falha persistir.

Se a falha desaparece, conseqüentemente o contato "S" ou "S_1" retornam a sua posição normal, o relé de sinal "A" rearma-se e a lâmpada apaga-se.

Teste. — Todas as lâmpadas podem ser testadas através do pulsador "Test" especialmente montado para este fim, que ao ser pressionado liga a linha "N", através do contato "A_3", a todas as lâmpadas.

Sistema de alarme em que cada ponto de sinalização requer duas lâmpadas

As figuras 149 e 150, mostram este tipo de alarme com um único relé de sinal para simplificação de sua interpretação.

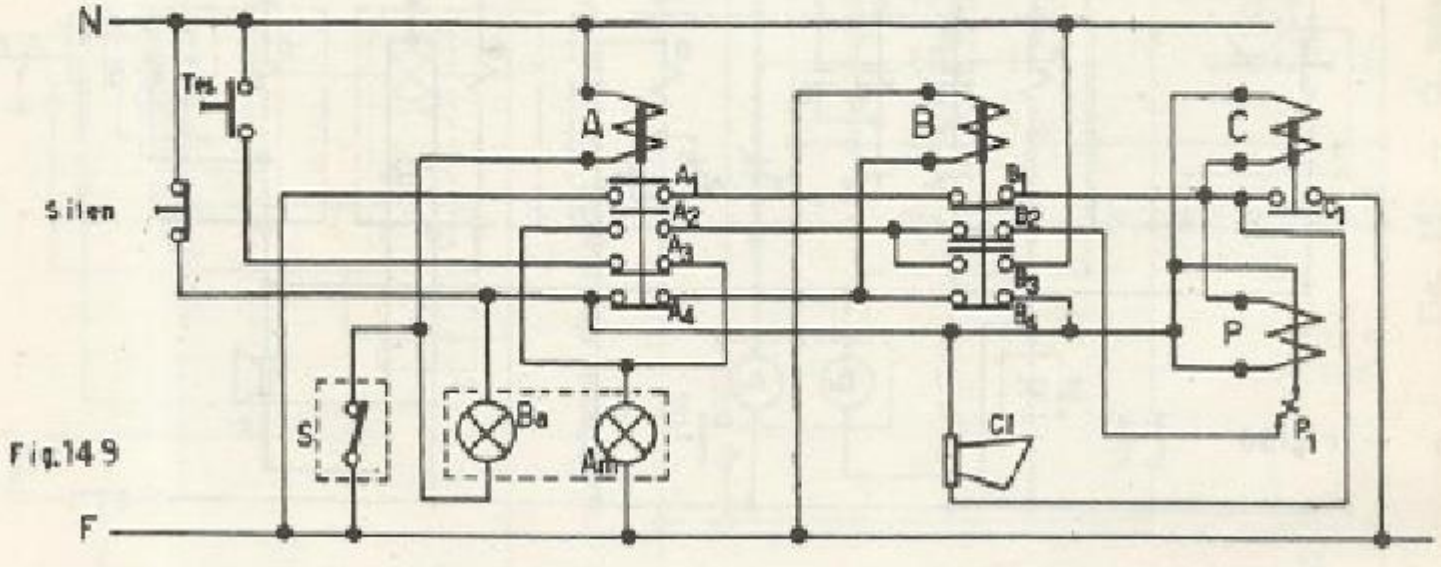


Fig.149

Fig 149 — Sistema de alarme com duas lâmpadas em cada ponto de sinalização.

Para cada relé de buzina "C" e de pisca-pisca "P" podem ser conectados aproximadamente 50 pontos ou relés de sinalização. O relé pisca-pisca é projetado para intermitência regular de aproximadamente 100 lampejos por minuto (intermitência rápida) ou 50 lampejos por minuto (intermitência lenta).

As figuras 151 e 152, mostram um contato de sinal "S" normalmente fechado, mantendo-se o relé "A" de "I" energizado e a lâmpada "Ba", branca acesa.

O contato de sinal "S_1" é duplo e através do contato "3" mantém-se a lâmpada "Ba" acesa. Quando ocorre uma alteração na instalação abre o contato "3", apagando a lâmpada "Ba" e fecha o contato "2", que energiza o relé "A" de "II".

Operação. — A operação do sistema de alarme das figuras 149, 150, 151 e 152, é similar a das figuras 147 e 148.

A lâmpada "Ba" permanece, normalmente, acesa pelo contato de sinal "S" ou "S_1".

Quando acontece alguma alteração, o contato de sinal "S" ou "S_1" faz com que se apague a lâmpada "Ba" (branca), e opere o relé "A", energizando o relé "C" da buzina e "P" do pisca-pisca, através dos contatos "A_1" e "B_1". Os relés "C" e "P" mantêm-se energizados pelo contato de auto-alimentação "C_1".

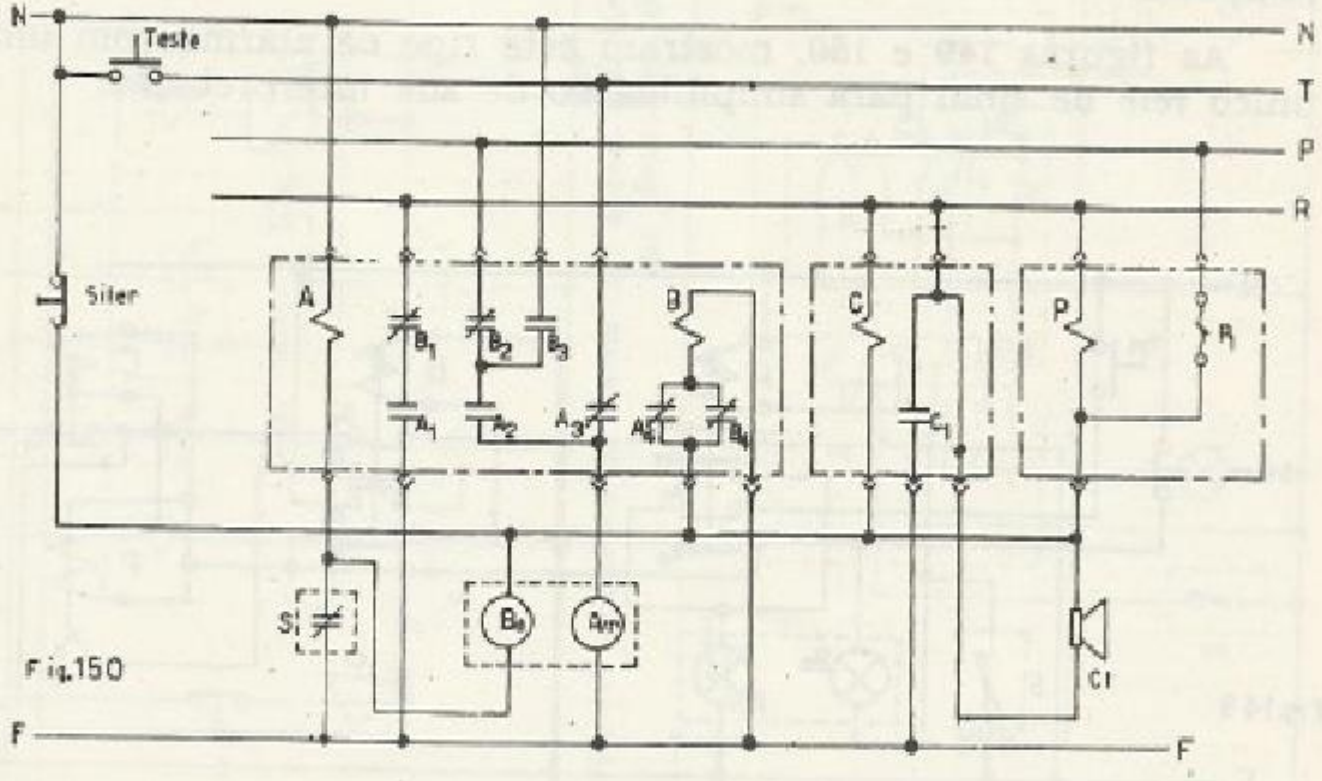


Fig. 150 — O mesmo esquema da fig. 149, em estilo americano.

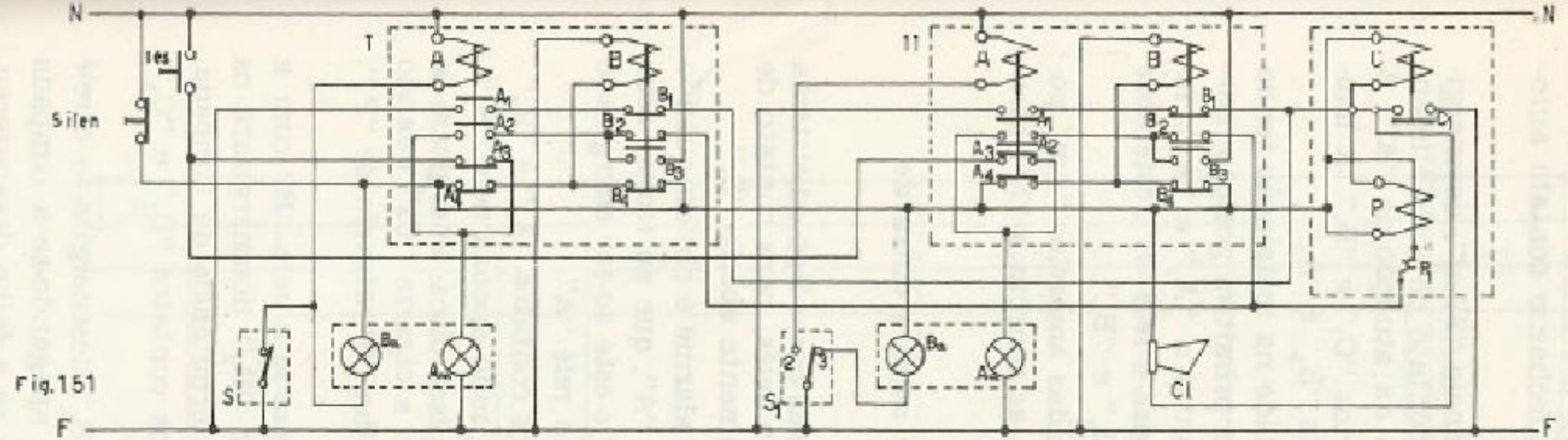


Fig.151

Fig. 151 — Sistema de alarme mostrando um contato de sinal «S» normalmente fechado e um outro «S_1» normalmente aberto.

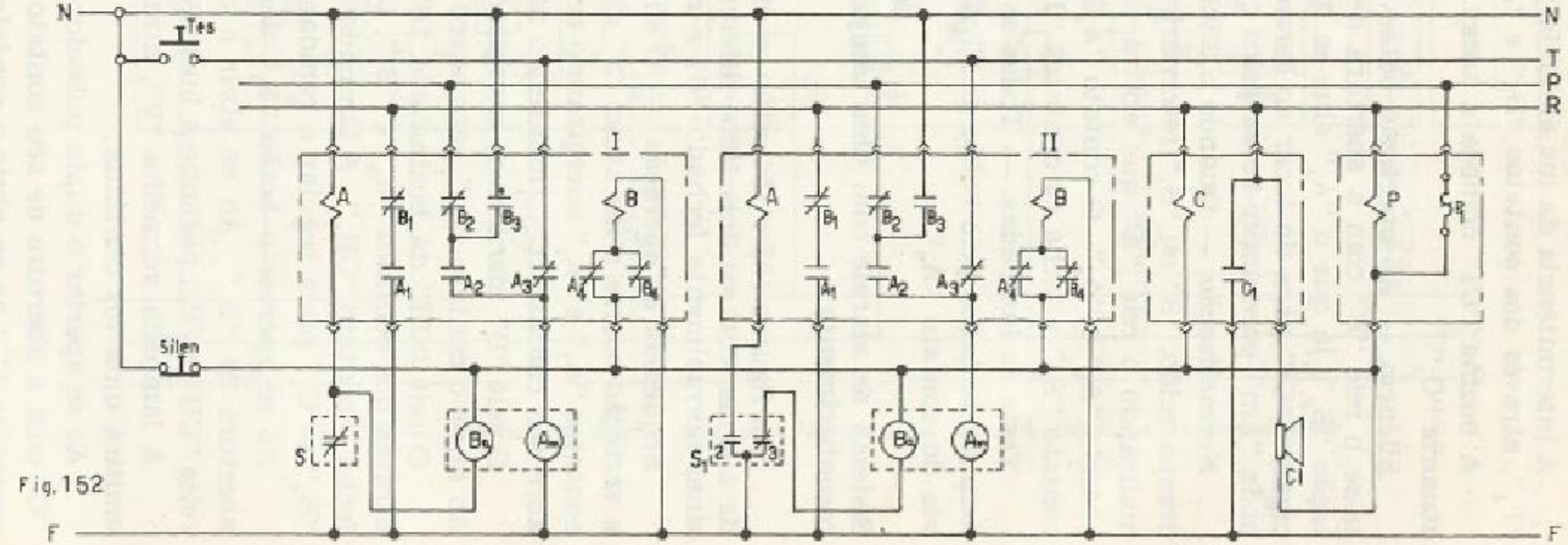


Fig.152

Fig. 152 — O mesmo esquema da fig. 151, representado em estilo americano.

A intermitência da luz amarela "Am" é obtida pelo pisca-pisca "P_1", através dos contatos "B_2" e "A_2":

A buzina "CI" começa a tocar ao se fechar o contato auto-atuante "C_1"

Silêncio. — Ao apertar o botão de silêncio "Silen", desenergiza-se o relé "B" com a abertura de seu contato de auto-alimentação "B_4", já que o "A_4" abre-se quando da atuação de "A" A cigarra "CI" pára de tocar ao serem abertos "C_1" e "B_1" A lâmpada "Am" permanece acesa pelos contatos "B_3" e "A_2".

Normalização. — Quando a anormalidade na instalação tenha desaparecido, "S" ou "S_1" retornarão a sua primitiva posição, normalizando o relé "A" que abrirá seus contatos "A_1" e "A_2", fechando "A_3" e "A_4". O contato "A_4" energiza o relé "B", este abre contato "B_3" e fecha os contatos "B_1", "B_2" e "B_4".

Teste de lâmpadas. — Todas as lâmpadas amarelas "Am" podem ser testadas pelo botão de "Test" que as conecta a "N", através do contato "A_3"

Sistema de alarme com uma lâmpada de aviso e outra de reconhecimento

Nas figuras 153 e 154 estão os diagramas deste tipo ou sistema de alarme, com os dois tipos diferentes de relés, para contato de sinal normalmente fechado "S" e normalmente aberto "S_1"

Seqüência de operação. — O sinal de alarme é obtido quando a variação ocorre e faz atuar "S" e o relé "A", que ao fechar seus contatos "A_1" e "A_2" energizam o relé "C" e este ao ser energizado abre seu contato "C_1", mantendo atuado o relé "A".

O relé "B" mantém-se energizado pelos contatos "A_4" e "B_3". Ao abrir o contato "A_1" permanece energizado apenas pelo "B_3".

O relé "CH" da buzina e o "P" do pisca-pisca, energizam-se através dos contatos "A_3" e "B_2", tocando a cigarra "CI" quando fecha o contato "CH_1". A lâmpada vermelha "V" através de "P_1", "B_4" e "C_3" pisca regular e rapidamente.

Ao se apertar o botão "S_2" desenergiza-se o relé "B" com a abertura de "B_3" Ao se abrir o contato "B_2" desenergizará os relés "CH" e "P", parando a buzina e a intermitência da lâmpada.

A lâmpada vermelha "V", através dos contatos "B_5" e "C_3", emitirá uma luz contínua.

Ao se apertar o duplo pulsador "L" "S_2" desenergiza-se o relé "C" com a abertura de seu contato "C_2", apagando-se a lâmpada vermelha "V" ao se abrir o contato "C_3", se a falha desapareceu.

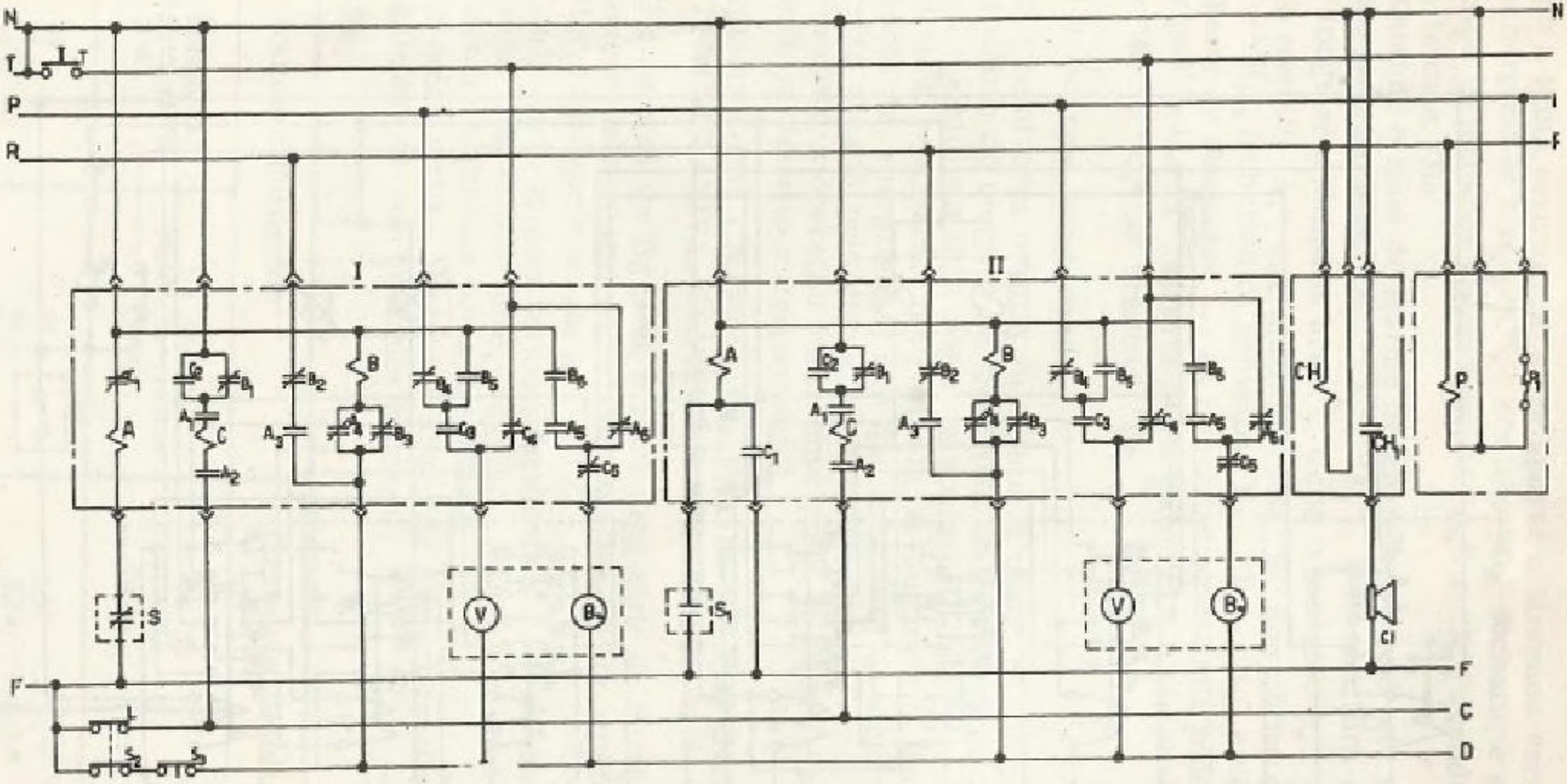


Fig. 153 — Sistema de alarme com uma lâmpada de aviso e outra de reconhecimento

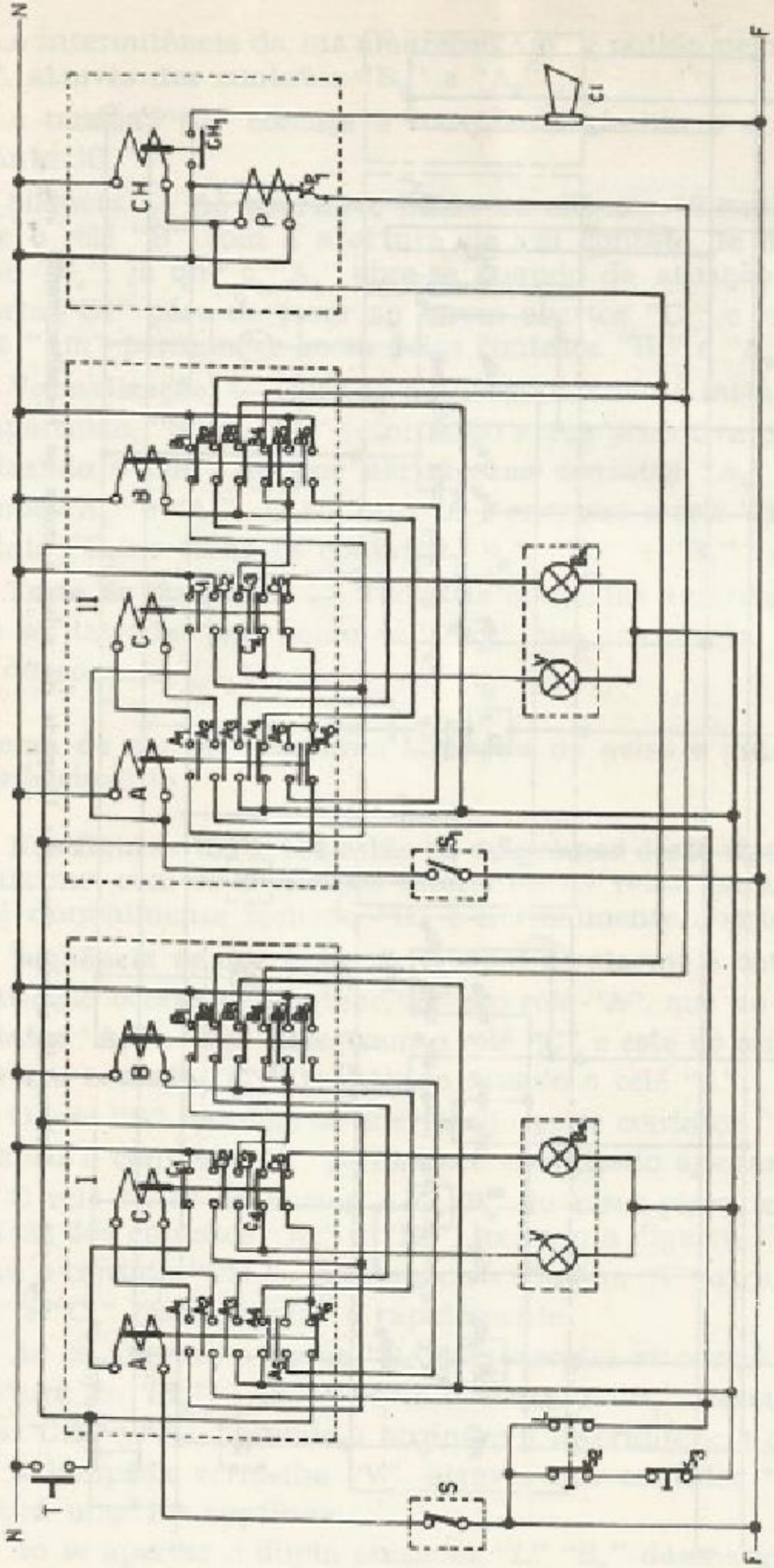


Fig.154

Fig. 154 — Diagrama idêntico ao da fig. 153, representado em estilo europeu.

Se a falha permanece, ao se apagar a lâmpada vermelha "V", e desenergizar-se o relé "C", o contato "C_5" fechará, e através dos contatos já fechados anteriormente "A_5" e "B_6" acenderá a lâmpada branca "Ba".

Quando o sinal de alarme desaparece e o relé "A" volta a sua posição normal, abre "A_1", "A_2", "A_3". Pela abertura do contato "A_5" apaga-se a lâmpada branca; fecha o contato "A_6"; fecha também o contato "A_4", energizando o relé "B" que abrirá os contatos "B_5" e "B_6", fechando os contatos "B_1", "B_2", "B_3" e "B_4".

Teste de lâmpadas. — As lâmpadas vermelhas podem ser testadas pelo botão "T", através do contato "C_4", e por meio dos contatos "A_6" e "C_5" as brancas, "Ba".

Sinal de alarme temporizado.

Um sinal com retardo de tempo é usado se um fechamento momentâneo do contato de sinal vem ocorrer durante a operação normal do equipamento supervisionado pelo relé. O relé de sinal possui uma retardação temporizada. A buzina e a lâmpada não são, portanto, energizadas, sem que o contato de sinal tenha permanecido atuado pelo tempo preestabelecido.

Fora isto, a operação é a mesma que a do sinal de alarme instantâneo já descrito anteriormente.

DETERMINAÇAO GRAFICA DO FATOR DE POTÊNCIA E DAS POTÊNCIAS ATIVA, REATIVA E APARENTE.

O diagrama da fig. 155, mostra uma série de curvas para determinação da potência ativa (W), reativa (VAr), aparente (VA) e o fator de potência ou cos φ.

Conhecendo-se dois termos, facilmente, pode-se encontrar ou determinar os outros dois, existindo entre eles as relações de dependência expressas pelas leis físicas.

As escalas ativa, reativa e aparente são arbitrárias, podendo ser multiplicada por qualquer número.

Exemplos de leitura.

Grandeza Fornecida		Grandeza Resultante	
Na horizontal Potência ativa (W)	Na vertical Potência reativa (VAr)	Fator de potência cos φ	Potência aparente VA
64	48	0,80	80
57,4	40,1	0,82	70
32,4	23,5	0,81	40
24	18	0,80	30

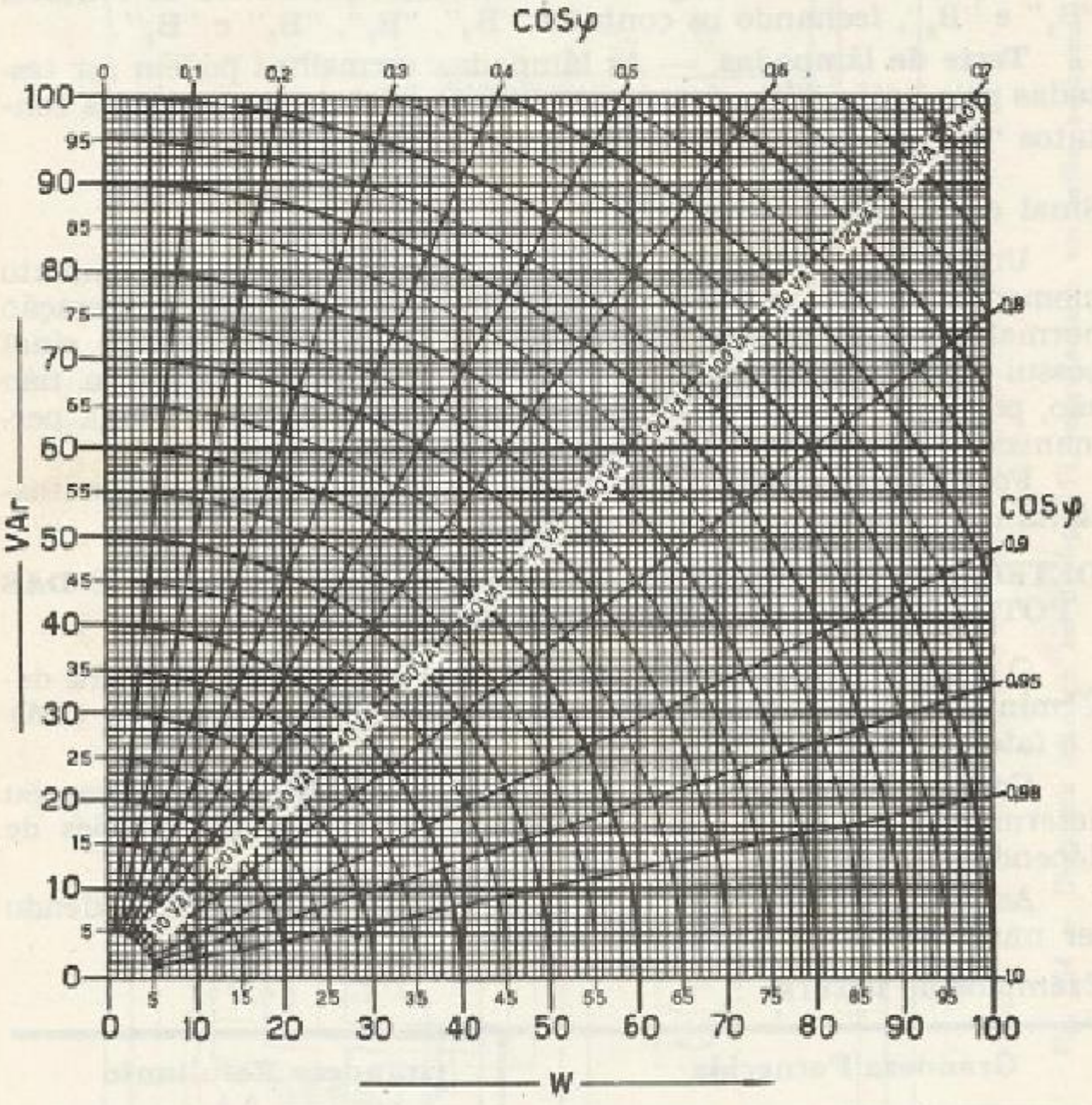
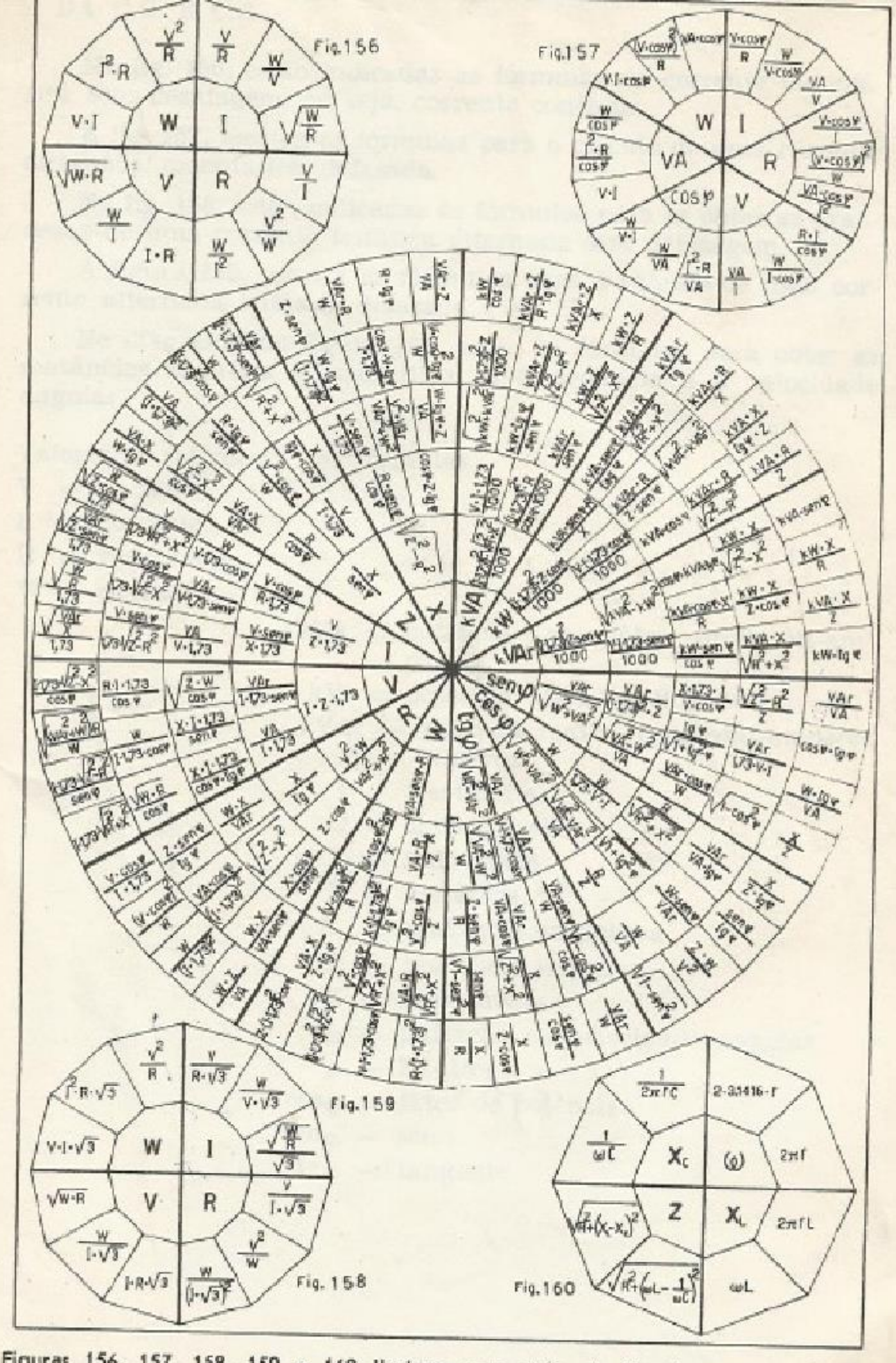


Fig. 155 — Determinação gráfica das potências ativa, reativa e aparente e do fator de potência.



Figuras 156, 157, 158, 159 e 160 ilustram uma série de fórmulas para a determinação de várias grandezas elétricas.

FÓRMULAS PARA DETERMINAÇÃO DE GRANDEZAS DA C.C. E C.A.

Na fig. 156, estão indicadas as fórmulas da corrente monofásica sem desafagem, ou seja, corrente contínua.

A fig. 157, mostra as fórmulas para o cálculo de uma corrente alternada monofásica defasada.

Na fig. 158, estão indicadas as fórmulas para se obter as grandezas de uma corrente trifásica alternada sem defasagem.

A figura 159, mostra as fórmulas para o cálculo de uma corrente alternada trifásica defasada.

No diagrama da figura 160, estão as fórmulas para obter as reatâncias indutiva e capacitiva, a impedância e a velocidade angular.

Valores de referência das fórmulas.

V — tensão.
I — corrente.
R — resistência.
W — potência.

kVA = potência aparente (quilovolt-ampères)
kW = potência ativa (quilowatt).
kVAr = potência reativa (quilovolt-ampères reativos)
f = freqüência.
C = capacitância.
L = indutância.
X = reatância.
X_c = reatância capacitiva.
X_L = reatância indutiva.
Z = impedância.
ω = pulsação ou velocidade angular.
π = 3,1416
$\cos\varphi$ = fator de potência.
$\text{sen}\varphi$ = seno.
$\text{tg}\varphi$ = tangente.

621.313
M95c

MUNOZ, Nardo Toledo

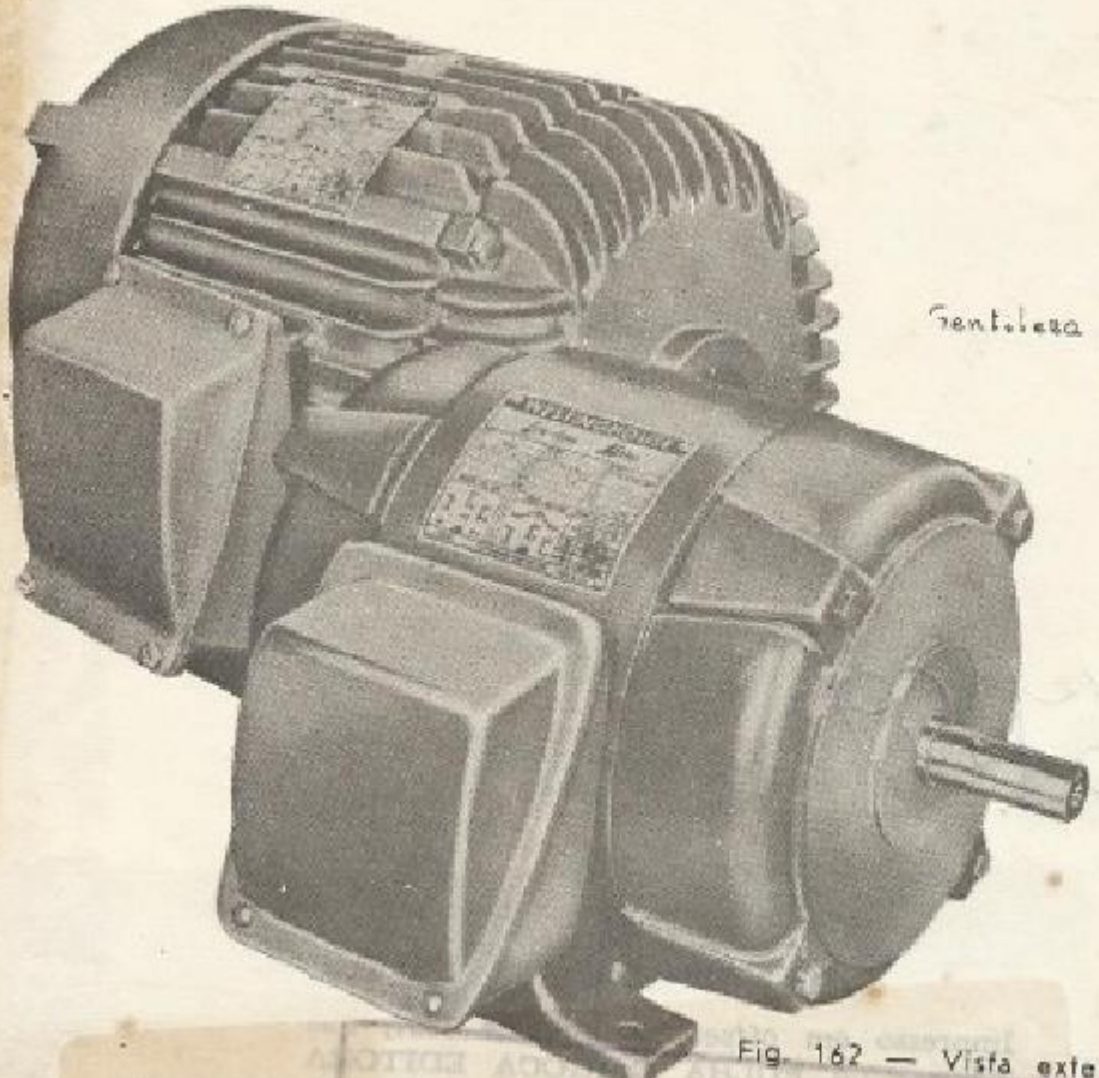
Cálculo de enrolamento de máquinas elétricas

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
ESCOLA TÉCNICA FEDERAL DE PERNAMBUCO
BIBLIOTECA
12004

(reedição)

Gentileza General Electric

Fig. 161 — Fotografia de uma botoneira.



Gentileza Westinghouse

Fig. 162 — Vista exterior de motores de C.A.

1996109

621.313
(01342)MUNOZ, Mardo Toledo
(02097)Calc.de enrolam.de maq.elet.
RIO DE JA:FREITAS BASTOS
1996109

675
106
779
780

170
3
11
510
195
75
780

690

01
5+9 61
2705 E.1

OUTROS LIVROS DA BIBLIOTECA TÉCNICA FREITAS BASTOS

ANÁLISE DE CIRCUITOS
Relatividade de Potenciais — O Teorema de Thévenin e as Estruturas de C.C. e de C.A.

Através de exercícios totalmente resolvidos, o autor transmite ao leitor a idéia de relatividade de potenciais e a aplicação do teorema de Thévenin às estruturas de corrente contínua e de corrente alternada. A leitura atenta do texto e o acompanhamento da resolução dos exercícios farão com que o estudante domine um dos mais importantes instrumentos para análise de circuitos.

TELEFONIA EM ALTA FREQUÊNCIA
David Talley

Exposição clara e precisa dos métodos de modulação e demodulação, multiplexagem, projetos de atenuadores, filtros elétricos e equalizadores. Trata ainda dos novos sistemas de portadora para cabos, dos novos métodos de sinalização e transmissão, dos aperfeiçoamentos nas técnicas PCM e das interconexões de sistemas de portadora para cabos, especialmente nos tipos de faixa larga com técnicas de rádio por microondas.

ARTES INDUSTRIAIS — PLANEJAMENTO E PRÁTICA
Chris H. Groneman — John L. Feirer

Nove capítulos que proporcionam ao leitor técnicas de desenho, esboço, desenho de projetos e de planejamento aplicáveis nas áreas de madeira, metal, eletricidade, plásticos, couro, mecânica do lar e cerâmica. O livro apresenta 50 projetos cuidadosamente planejados e informações sobre planejamento, medidos de segurança e manejo das ferramentas comumente usadas nas oficinas.

BIBLIOTECA TÉCNICA FREITAS BASTOS

CÁLCULO DE ENROLAMENTOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS E SISTEMAS DE ALARME

Nardo Toledo Muñoz

O título desta obra sintetiza o seu conteúdo, embora não diga da riqueza de informações teóricas e práticas que proporciona sobre enrolamentos das máquinas de C.C. e de C.A., sobre modificações dos mesmos com referência a alterações de velocidades e tensões, e sobre sistemas de alarme, de proteção e de controle para máquinas.

O grande número de ótimas ilustrações e de exercícios resolvidos facilita a assimilação dos conhecimentos apresentados em 24 capítulos do maior interesse para o profissional.

ATENDE PELO REEMBOLSO POSTAL